

# Analiza recesijskih segmenata hidrograma izvora Rakovac, Žumberačka gora

---

Pikec, Ana Marija

Master's thesis / Diplomski rad

2019

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:733078>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-23**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij geološkog inženjerstva

ANALIZA RECESIJSKIH SEGMENTA HIDROGRAMA IZVORA RAKOVAC,  
ŽUMBERAČKA GORA

DIPLOMSKI RAD

**Ana Marija Pikec**

**GI 349**

Zagreb, 2019.

ANALIZA RECESIJSKIH SEGMENTATA HIDROGRAMA IZVORA RAKOVAC,  
ŽUMBERAČKA GORA

ANA MARIJA PIKEC

Diplomski rad je izrađen u: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Ovaj diplomski rad bavi se analizom recesijskih segmenata hidrograma izvora Rakovac (Žumberačka gora). Prema podacima dnevnih izdašnosti na izvoru Rakovac, izrađene su glavne krivulje recesije korištenjem dviju metoda: prilagođene „matching strip“ metode i metode temeljene na trigonometrijskim funkcijama. Cilj je istaknuti metodu koja daje bolje rezultate prilikom konstrukcije glavne krivulje recesije. Interpretacijom dobivenih rezultata izdvojena je eksponencijalna glavna krivulja recesije kao krivulja koja najbolje opisuje recesijske segmente hidrograma izvora Rakovac.

Ključne riječi: glavna krivulja recesije, recesijski segmenti, izvor Rakovac, krški  
vodonosnik

Diplomski rad sadrži: 32 stranice, 14 slika i 33 reference

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta  
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Prof. dr. sc. Kristijan Posavec

Ocjenjivači: Prof. dr. sc. Kristijan Posavec

Izv. prof. dr. sc. Jelena Parlov

Doc. dr. sc. Zoran Kovač

Datum obrane: 06. rujna 2019.

THE HYDROGRAPH RECESSION SEGMENTS ANALYSIS OF THE SPRING OF  
RAKOVAC, THE ŽUMBERAK MOUNTAINS

ANA MARIJA PIKEC

Thesis completed in: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum engineering  
Department of Geology and Geological Engineering  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

The main focus of this thesis is the hydrograph recession segments analysis of the spring of Rakovac (the Žumberak mountains). The main recession curves were created according to the obtained data concerning the daily streamflow at the spring of Rakovac by using two methods: the adjusted version of matching strip method and the method based on the use of trigonometric functions. The aim of the study was to point out the method that yields better results while constructing the main recession curve. The interpretation of the results provided us with a main recession curve of exponential growth as the one that best illustrates the hydrograph recession segments of the spring of Rakovac.

Keywords: the main recession curve, recession segments, the spring of Rakovac, karst aquifer

Thesis contains: 32 pages, 14 figures and 33 references

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,  
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: PhD Kristijan Posavec, Full Professor

Reviewers: PhD Kristijan Posavec, Full Professor

PhD Jelena Parlov, Full Professor

PhD Zoran Kovač, Assistant Professor

Date of defense: September 6<sup>th</sup>, 2019

## Sadržaj

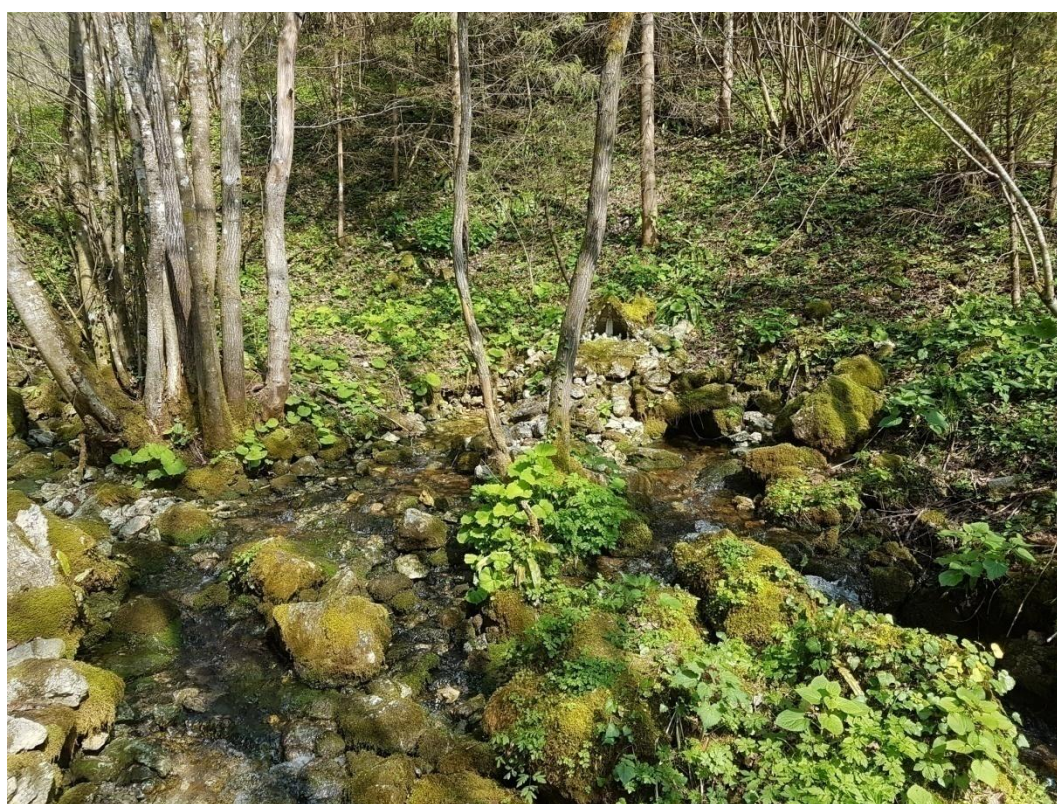
1. Uvod .....	1
2. Geografska i geomorfološka obilježja istraživanog područja .....	4
3. Geološke značajke istraživanog područja.....	6
3.1. Litostratigrafski opis .....	7
3.2. Strukturna građa i tektonika .....	9
4. Hidrogeološke značajke.....	11
5. Općenito o recesijskoj analizi.....	13
6. Metode konstrukcije krivulje recesije.....	16
6.1. Prilagođena „Matching strip“ metoda.....	16
6.2. Metoda temeljena na trigonometrijskim zakonima.....	19
7. Konstrukcija glavne recesijske krivulje.....	22
8. Interpretacija dobivenih rezultata .....	26
9. Zaključak .....	28
10. Literatura .....	30

## Popis slika

Slika 1.1. Izvor Rakovac za vrijeme srednjih voda .....	1
Slika 2.1. Lokacija istraživanja prikazana na topografskoj podlozi M1:25.000 .....	4
Slika 3.1. Digitalizirana Osnovna geološka karta lokacije istraživanja prema Šikić i dr. (1977.).....	6
Slika 4.1. Digitalizirana Hidrogeološka karta istraživanog područja prema Vujnović (2010.).....	12
Slika 6.1. Postupak konstrukcije glavne krivulje recesije (Posavec i dr., 2006.).....	18
Slika 6.2. Koncept korištenja trigonometrijskih funkcija prilikom translacije recesijskih segmenata (Posavec i dr., 2017.).....	20
Slika 6.3. Postupak konstrukcije glavne krivulje recesije (Posavec i dr., 2017.).....	21
Slika 7.1. Hidrogram dnevnih protoka izvora Rakovac .....	22
Slika 7.2. Glavna krivulja recesije hidrograma izvora Rakovac konstruirana eksponencijskim regresijskim modelom .....	23
Slika 7.3. Glavna krivulja recesije hidrograma izvora Rakovac konstruirana regresijskim modelom opće potencije .....	23
Slika 7.4. Glavna krivulja recesije hidrograma izvora Rakovac konstruirana logaritamskim regresijskim modelom.....	24
Slika 7.5. Glavna krivulja recesije hidrograma izvora Rakovac konstruirana regresijskim modelom polinoma drugog reda .....	24
Slika 7.6. Glavna krivulja recesije hidrograma izvora Rakovac konstruirana linearnim regresijskim modelom.....	25
Slika 7.7. Glavna krivulja recesije hidrograma izvora Rakovac konstruirana pomoću trigonometrijskih funkcija.....	25

## 1. Uvod

Reakcija krškog vodonosnog sustava na događaj oborine, vidljiva je na mjestu koncentriranog pražnjenja, odnosno na izvoru. Mjerenjima izdašnosti pojedinog izvora u vremenu, dobiva se hidrogram istjecanja čiji se elementi mogu analizirati. U radu je prikazana analiza recesijske krivulje hidrograma, dobivenog mjerenjima na izvoru Rakovac. Izvor Rakovac (slika 1.1.) smješten je na sjeveroistočnom dijelu Žumberačke gore, oko 13,5 km zapadno od grada Samobora.



Slika 1.1. Izvor Rakovac za vrijeme srednjih voda

Oblik složenog hidrograma istjecanja krškog izvora omogućava izdvajanje padajućeg (recesijskog) dijela hidrograma. Prikazom recesijskog dijela složenog hidrograma u linearno-logaritamskom (lin-log) mjerilu, dobiva se nekoliko segmenata različitih nagiba, tj. različitih vrijednosti koeficijenta recesije, koji su zabilježeni u različito vrijeme i ovise o nizu čimbenika poput varijabilnosti uskladištenja, gubitaka isparavanjem, brzini ponovnog punjenja itd. Zbog toga su razvijene metode koje se bave vremenskim nizovima istjecanja na izvoru, temeljene na preklapanju pojedinih recesijskih segmenata, kako bi se dobila

glavna krivulja recesije. Glavna krivulja recesije predstavlja osrednje pražnjenje krškog vodonosnika, te ukazuje na hidrodinamička svojstva vodonosnog sustava i geomorfološke značajke pripadajućeg sliva. Analizom recesijske krivulje dobivaju se vrijedni podaci o mogućnostima uskladištenja i karakteristikama krškog vodonosnog sustava.

Analiza krivulje recesije neophodna je za procjenu uskladištenja i hidrauličke vodljivosti krškog vodonosnog sustava. **Fiorillo** (2014.) je u svojem radu dao detaljan opis recesijske krivulje hidrograma izvora, te njenu primjenu u hidrogeologiji. Fokusirajući se na krške vodonosnike, opisao je moguće pristupe, odnosno modele prilikom analize krivulje recesije, te je istaknuo moguće poteškoće i nedoumice koje se nameću prilikom interpretacije recesijske krivulje hidrograma izvora. **Mayaud i dr.** (2016.) proučavali su ponašanje krškog vodonosnika na području krškog sustava „Lurbach“, oko 20 km sjeverno od Graza. Četverogodišnjem praćenjem hidrograma krškog izvora uočili su promjene u obliku samog hidrograma. Vršne vrijednosti protoka bile su niže, a bazni protok veći nego prethodnih godina. Analizom recesijske krivulje hidrograma izvora ustanovljeno je da su promatrane hidrološke promjene izazvane promjenama unutar krškog vodonosnog sustava, a ne promjenama hidrometeoroloških uvjeta. U okviru rada napravljen je MODFLOW model krškog vodonosnog sustava, kako bi se objasnilo funkcioniranje vodonosnika. Dobiveni rezultati simulacije upućivali su na promjenu hidrauličke vodljivosti i uskladištenja unutar mreže kanala zbog mogućeg začepljenja kanala i pora vodonosne stijene. **Amit i dr.** (2002.) u svom su radu analizirali višegodišnje podatke osam krških izvora u planinama Judean i Galilej, sjeverni Izrael. Usporedbom recesijskih krivulja različitih izvora iz različitih godina mjerenja podataka, zaključili su kako glavne čimbenike koji utječu na eksponencijalne koeficijente recesijske krivulje čine litologija vodonosnika te geometrija kanala unutar vodonosnika. **Parlov** (2010.) je u svojoj doktorskoj disertaciji koristila analizu krivulje recesije za određivanje hidrogeoloških parametara vodonosnika u porječju rijeke Mirne. U radu je za konstrukciju glavne krivulje recesije korištena prilagođena „matching strip“ metoda (**Posavec i dr.**, 2006.). Međutim pokazalo se kako pojedini izvori imaju višestruki režim pražnjenja, a u tu svrhu korištena je potpuno automatizirana „matching strip“ metoda (**Posavec i dr.**, 2010.). Pomoću dobivenih koeficijenata recesije određeni su hidrogeološki parametri potrebni za modeliranje toka. **Relota** (2011.) je u svom diplomskom radu koristila analizu krivulje recesije kako bi odredila utjecaj oborina na oblik recesijske krivulje. U radu je analizirano šest izvora u porječju rijeke Mirne i Raše. Rezultati nisu pokazali jaku povezanost visina oborina i



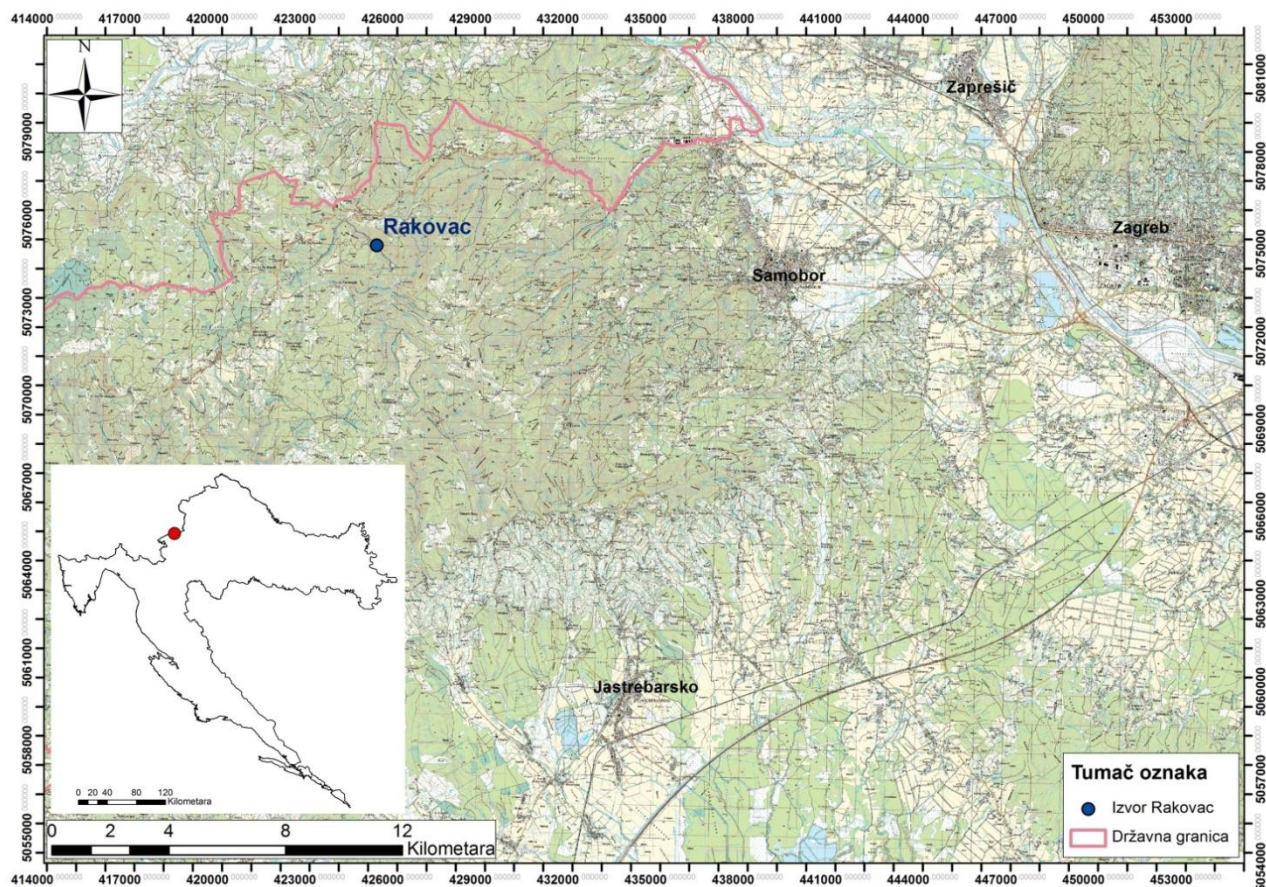
režima pražnjenja krškog vodonosnika. Ovakvi rezultati opravdani su uzimanjem prekratkog vremenskog razdoblja mjerenja podataka.

U okviru ovog rada korištene su dvije metode za konstrukciju glavne krivulje recesije: prilagođena „matching strip“ metoda (**Posavec i dr.**, 2006.) te nova metoda temeljena na trigonometrijskim zakonima (**Posavec i dr.**, 2017.). Korištenjem navedenih metoda, cilj je bio izdvojiti glavnu krivulju recesije koja najbolje opisuje režim istjecanja na izvoru Rakovac.

Prilikom izrade rada korišteni su softveri: „ArcMap“ za izradu karata i Microsoft Excel za konstrukciju glavne krivulje recesije. Za dobivanje hidrograma istjecanja bilo je potrebno prikupiti podatke o dnevnim protocima na izvoru Rakovac.

## 2. Geografska i geomorfološka obilježja istraživanog područja

Područje istraživanja obuhvaća izvor Rakovac ( $X=425306,428$  m;  $Y=5074795,281$  m) koji se nalazi na sjeveroistočnom dijelu Žumberačke gore, oko 13,5 km zapadno od grada Samobor (slika 2.1.). Žumberačka gora nalazi se u središnjem zapadnom dijelu Republike Hrvatske. Pod nazivom Žumberačka gora podrazumijeva se geomorfološki složena, ali jedinstvena gorska reljefna cjelina čiji se dijelovi još nazivaju: Samoborsko gorje s Plešivicom - sjeveroistočni dio, Žumberačko gorje ili Žumberak - središnji i zapadni dio te Gorjanci - slovenski dio (Dujmović, 1994.). Granicu između Samoborskog gorja i Žumberka čine tokovi rječice Bregane i Žumberačke rijeke.



Slika 2.1. Lokacija istraživanja prikazana na topografskoj podlozi M1:25.000

Najviši vrhovi ovog područja su Sveta Gera (1178 m n.m.) u Žumberačkom gorju i Japetić (879 m n.m.) u Samoborskom gorju. Generalno se visoravni s uzvišenjima na sjevernom dijelu postupno spuštaju prema jugoistoku.

S obzirom na strukturno-geomorfološke značajke istraživano područje svrstava se u skupinu rasjedno-boranih masiva mezozojskog nabiranja heterogenog tipa (**Bognar**, 1980.). Generalni smjer pružanja rasjeda u Samoborskom gorju i istočnom dijelu Žumberka jest SI-JZ, dok u ostatku Žumberka prevladavaju rasjedi dinarskog smjera pružanja SZ-JI.

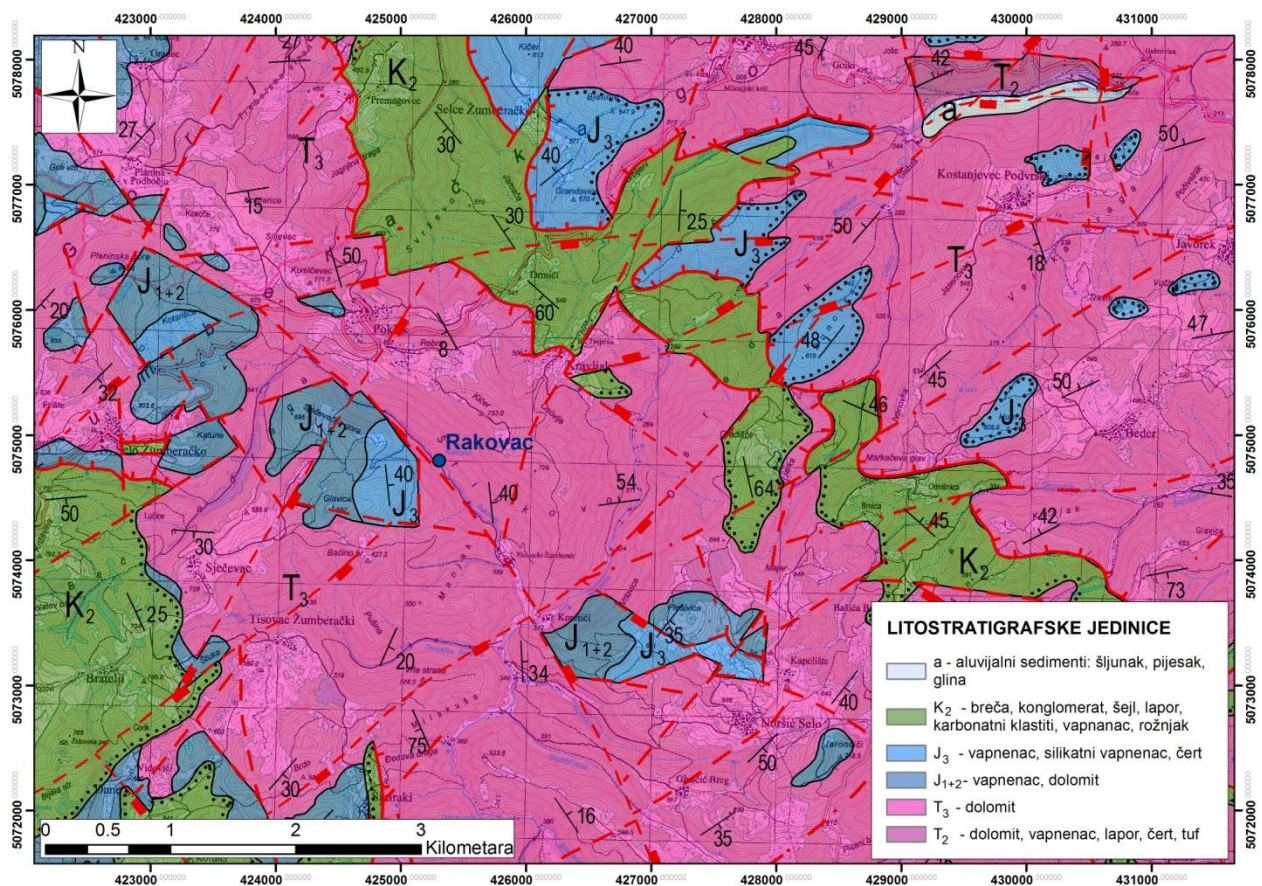
Prema hidrogeološkoj podjeli krša u Hrvatskoj (**Herak i dr.**, 1969.) istraživano područje dio je Unutrašnjeg krškog pojasa, odnosno krša sjeverne Hrvatske. Teren je pretežno prekriven trijaskim, krednim i jurskim karbonatnim naslagama, odnosno vapnencima i dolomitima. Izvor Rakovac nalazi se u blizini kontakta jurskih vapnenaca i trijaskih dolomita.

Unutar spomenutih naslaga razvijen je fluviokrški i krški reljef sa specifičnom krškom podzemnom hidrografijom. Prema **Buzjak** (2001.) 90% terena Samoborskog i Žumberačkog gorja je okršeno, no važno je spomenuti da je riječ o pokrivenom kršu. S obzirom da se paleozojski i donjotrijaski klastiti, koji čine vodoodrživu osnovu, nalaze blizu površine, dubina okršavanja je mala. Najčešći reljefni oblici su ponikve, uglavnom tanjurastog i ljevkastog oblika, korozijskog postanka. Također su česte uvale i suhe doline, a među fluviokrškim formama ističu se aktivne ili fosilne slijepe doline, nastale na kontaktu nepropusnih ili slabije propusnih naslaga s okršenim karbonatnim naslagama. Općenito pojava vode na površini vezana je za kontakte sličnog karaktera.

Na strmijim predjelima, gdje nagibi padina povećavaju koeficijent površinskog otjecanja, intenzitet okršavanja je manji, kao i u područjima gdje prevladavaju slabije propusne stijene (srednje- i gornjotrijaski dolomit). Na fluviokrškim, i u manjoj mjeri krškim predjelima Žumberačke gore, dominantni padinski procesi su siparenje, jaruženje i klizanje (**Vujnović**, 2010.).

### 3. Geološke značajke istraživanog područja

Područje istraživanja karakterizirano je vrlo kompleksnom geološkom građom što je rezultat intenzivnih geotektonskih aktivnosti tijekom geološke prošlosti (slika 3.1.). Zbog izmjene uvjeta sedimentacije, nastajale su stijene različitog petrografskog sastava i litoloških značajki. Kompleksna građa istraživanog područja očituje se u čestim horizontalnim i vertikalnim izmjenama u slijedu naslaga. Prikaz površinskih naslaga načinjen je prema Osnovnoj geološkoj karti 1:100.000 (Šikić i dr., 1977.) i pripadajućem tumaču za list Zagreb (Šikić i dr., 1979.). Na užem području istraživanja litostratigrafske jedinice protežu se od srednjeg trijasa (T<sub>2</sub>) do gornje krede (K<sub>2</sub>). Na temelju Osnovne geološke karte 1:100.000, lista Zagreb, izrađena je digitalizirana karta užeg područja istraživanja korištenjem ArcMAP softvera (slika 3.1.).



Slika 3.1. Digitalizirana Osnovna geološka karta lokacije istraživanja prema Šikić i dr. (1977.)

### 3.1. Litostratigrafski opis

Naslage srednjeg trijasa ( $T_2$ ) karakteriziraju svijetlosivi do sivi gromadasti vapnenci, dolomitizirani vapnenci i dolomit. Na području Gregurić Brega izdvojeni su sedimenti ladiničke starosti, a sastoje se od cefalopodnih crvenih i sivih vapnenaca, vapnenačko laporovitih naslaga, tamnih uslojenih vapnenaca sa glinovitim ulošcima, šejlova i piroklastita. Na području Kostanjevca i potoka Slapnice najzastupljeniji su ranodijagenetski dolomiti koji čine „Ruškovlje formaciju“ debljine oko 590 metara. Dolomiti su često rekristalizirani, zbog čega ih se naziva „šećerasti dolomiti“, a taloženi su u peritajdalnom okolišu uz povremene oscilacije morske razine. Unutar ovih dolomita izdvojena su dva litostratigrafska člana „Berdiki član“ i „Kolići član“. Član Berdiki javlja se u vrijeme anizika i karakteriziran je crvenim pjeskovitim laporima, dok se član Kolići javlja početkom ladinika, a čine ga siltiti, lapori, piroklastiti, rožnjaci i u vršnom dijelu naslaga silificirani vapnenci te pločasti sivi vapnenci s pojavama rožnjaka (**Bukovac i dr.**, 1995.).

Dolomiti gornjeg trijasa ( $T_3$ ) prekrivaju najveći dio istočnog Žumberka, a prostiru se od Krke i Save na sjeveru do linije Plešivica-Slavetić-Ruda (Mačković Brdo) na jugu. Sedimenti su svijetlosive do tamnosive boje, ovisno o udjelu glinovite komponente. Dio dolomita odlikuje se izraženom laminacijom algalnog tipa (stromatoliti), što ukazuje na dolomitizaciju u ranoj fazi dijageneze. Osim dolomita stromatolitnog tipa ponegdje dolazi do izmjene homogenih mozaičnih dolomita ili zrnastih dolomita. U najvišim dijelovima gornotrijaske naslage obilježene su izmjenom dolomita, sivih vapnenaca i dolomitiziranih vapnenaca. Ukupna debljina naslaga procijenjena je na 1570 metara. Prema **Bukovac i dr.** (1995.) te **Grgasović** (1998.), naslage gornjeg trijasa podijeljene su u formacije: Slapnica (s članovima Vranjak i Drenovec) debljine 340 metara, Glavni dolomit (s članom Kalje) debljine 960 metara i Posinak debljine 270 metara. Formacija Slapnica pripada karniku, a obilježena je dobro uslojenim ranodijagenetskim dolomitima s ritmičkim izmjenama dolomikrita, fenestralnog dolomitai stromatolita. Unutar iste formacije izdvajaju se član Vranjak kojeg čine dolomiti s proslojcima šejla te član Drenovac s ravno i valovito uslojenim tamnim ranodijagenetskim dolomitima s visokim udjelom kerogena, proslojcima kerogenskog šejla i pojavama ugljena. Norička formacija Glavni dolomit predstavlja ranodijagenetske dolomite s bočnom i vertikalnom izmjenom dolomikrita, fenestralnih dolomikrita i finolaminiranih stromatolita, te sa stololitskim slojnim plohama. Unutar Glavnog dolomita izdvaja se član Kalje s intraformacijskim brečama. Formacija Posinak

pripada retu, a predstavlja dobro uslojene ranodijagenetske dolomite, podređeno dolomitične vapnence i vapnence.

Naslage donje i srednje jure (**J<sub>1+2</sub>**) ističu se na nekoliko lokaliteta od zapada prema istoku, a u istom smjeru lijaske plitkovodne naslage istanjuju. Debljina naslaga kod Rajića iznosi oko 150 metara, dok je kod Noršić Sela samo nekoliko metara. U donjem dijelu lijasa nalaze se dobro uslojeni dolomiti, dolomitični vapnenci i vapnenci s rijetkim foraminiferama. Srednji lijas predstavlja karbonatnu plitkovodnu seriju kalkarenita, biokalkarenita, oolitskih kalkarenita, te biomikrita i mikrita u izmjeni s čestom pojavom dolomitizacije vapnenaca. U gornjem lijasu došlo je do razbijanja trijasko-lijaske karbonatne platforme i stvaranja dubljeg bazenskog prostora. U daljnjem slijedu donju i srednju juru obilježili su dolomiti i vapnenci s radiolarijskim rožnjacima, a na njih slijede pelagički sedimenti (mikriti, biomikriti i rožnjaci). Intrabazenske karbonatne breče (doger) pojavljuju se u zonama, a na njih su taloženi vapnenci i silificirani vapnenci s rožnjacima.

Naslage gornje jure (**J<sub>3</sub>**) obilježene su sedimentacijom vapnenaca s pelagičkim školjkašima i rožnjacima. Na temelju pojave vapnenačkih klastita turbiditnog podrijetla unutar kontinuirane pelagičke serije izdvojen je malm. U razdoblju donjeg malma (oksford i kimeridž) taloženi su bijeli i sivi vapnenci, oolitni vapnenci i grebenski vapnenci, a izdvojeni su na području oko Radatovića. Debljina naslaga donjeg malma iznosi oko 200 metara. U gornjem malmu (titon) taloženi su pelagički sedimenti. Naslage gornjeg malma nalaze se na području navlačnog kontakta na grebenima Osredek i Tuščak, te u dolini između Tuščaka i Stojdrage. Izmjenjuju se uglavnom tankouslojeni pločasti pelagički mikriti sive, zelenkastosive, sivosmeđe i ružičaste boje, biomikriti i rožnjaci, a mjestimično se nalaze litokalkareniti turbiditnog podrijetla te tanki proslojci lapora.

Naslage gornje krede (**K<sub>2</sub>**) u donjem dijelu slijeda taloženja sadrže bazalne breče i konglomerate. Na njih se taloži debela serija flišolikih sedimenata smeđosive do tamnosive boje, a prevladavaju vapnoviti i glinoviti lapori, šejlovi i kalkareniti. Flišoliki sedimenti su u izmjeni s tankopločastim vapnencima i rožnjacima, a mjestimice su prisutni i proslojci karbonatnih breča. Prema fosilnim ostacima utvrđena je cenomanska starost. U tektonski razlomljenom pojasu od Novog Sela Okićkog do Svete Jane, i u jugozapadnom dijelu Plešivice, naslage gornje krede uglavnom pripadaju senonu te su nešto drugačijih litofacijskih značajki. U donjem dijelu taloženi su bazalni sedimenti, a na njih slijedi 10-20 metara debela uslojena izmjena vapnenačkih breča, kalkarenita, lapora i laporovitih vapnenaca s rijetkim rožnjacima. Na njih slijede crvenkasti, ružičasti i sivi pločasti

globotrunkanski vapnenci s rožnjacima. U gornjem dijelu slijeda senonskih naslaga nalaze se karbonatni klastiti i lapori.

### 3.2. Strukturna građa i tektonika

Na području Žumberačkog i Samoborskog gorja prevladavaju vrlo složeni strukturno tektonski odnosi. S obzirom da šire područje istraživanja pokrivaju tri različita lista Osnovne geološke karte, strukturni odnosi i tektonika interpretirani su na nekoliko načina. Područje istraživanja, odnosno sjeveroistočni dio Žumberačke gore prikazan je na listu Zagreb, gdje su definirani tangencijalni tektonski pokreti, tj. navlačni strukturno tektonski odnosi između pojedinih članova. Područje Zagreba podijeljeno je u osam tektonskih jedinica na temelju rekonstrukcije značajnih tektonskih pokreta. Uže područje istraživanja pripada tektonskoj jedinici „Žumberačko-medvednička navlaka“.

Tektonska jedinica *Žumberačko-medvednička navlaka* prostire se Samoborskim gorjem i istočnim Žumberkom do linije Prodin Dol-Tihočaj-Golubići-Novo Selo Žumberačko. Navlaka je izgrađena od sedimenata trijasa, jure i krede, koji su u savskoj orogenetskoj fazi navučeni na autohtone stijene istočnog Žumberka i jugozapadnog dijela Medvednice. Primarno jedinstvena navučena masa je naknadnim tektonskim i erozijskim procesima razbijena u četiri ljuske (Japetić, Cirkov i Vrhovčak u Samoborskom gorju te Zakičnica u jugozapadnoj Medvednici). Područje istraživanja nalazi se unutar strukturne jedinice Japetić. Strukturna jedinica Japetić predstavlja alohtonu masu, čija jugozapadna granica čini čelo navlake. Nastavak čela navlake prema jugoistoku prekriven je sedimentima neogena. Značajan rasjed sa sjeverozapadne strane Plešivice odvojio je gornjotrijaske alohtone dolomite Plešivice od autohtonih gornjopermskih, krednih, ofiolitskih i paleogenskih stijena u podlozi.

Tektonsku jedinicu *autohton Žumberka* čine izrazito tektonizirane stijene stvarane od srednjeg perma do paleogena, a danas leže u podlozi alohtonih elemenata te nisu premještanu savskoj orogenoj fazi. Jezgra autohtona istočnog Žumberka izgrađena je od klastita mlađeg perma. Postupnim izdizanjem u gornjem permu, formirane su djelomice izolirane lagunske sredine koje su opstale i za vrijeme permotrijasa. Zbog stalno prisute tektonske aktivnosti, hidrotermalne otopine prodirale su u gornjopermske naslage, a rezultat tih procesa je nastanak rudnih ležišta bakrene i željene rude. Tijekom donjeg trijasa uspostavljena je plitkovodna marinska sedimentacija. U aniziku se, uz ravnomjerno

spuštanje bazena, ustalila karbonatna sedimentacija koja je trajala sve do srednjeg lijas (ladinik, karnik). Do značajnijih tektonskih pokreta došlo je u ladiniku, kada su nastali duboki rasjedi praćeni submarinskim vulkanizmom. Na prijelazu iz srednjeg u gornji lijas, došlo je do rasjedanja u smjeru sjeverozapad-jugoistok (dinarski tip rasjeda), čime je počelo razbijanje trijasko-lijaske karbonatne platforme. Za dinarsko područje je karakteristična bazenska i šelfna sedimentacija, a područje Žumberka postaje sastavni dio bazenskog prostora s izraženom pelagičkom sedimentacijom. Krajem valendisa i početkom otriva dolazi do izdizanja i okopnjavanja na području Žumberka, čime je nastao paleoreljef s otkrivenim permskim, trijaskim i jurskim sedimentima. U cenomanu ponovo dolazi do transgresije (flišno-turbiditni tip sedimentacije). U to vrijeme (cenoman-turon) uži dio samoborskog gorja postoji kao izdignuta strukturna barijera, koja odvaja Žumberak od tektonske zone vulkanogeno-sedimentnog kompleksa. U paleogenu se područje istočnog Žumberka izdiže, a od eocena, nakon intenzivnih tektonskih pokreta, zajedno s vulkanogeno-sedimentnim kompleksom i kristalinom Medvednice tvori jedinstveno kopno.



## 4. Hidrogeološke značajke

Hidrogeološki uvjeti uvjetovani su hidrogeološkim osobitostima naslaga, njihovim strukturnim sklopom i geomorfološkim značajkama područja, te hidrološkim prilikama i rezultirajućim rubnim uvjetima u prostoru i vremenu (**Parlov**, 2010.). Hidrogeološke značajke istraživanog područja su prikazane s obzirom na vrstu stijena, tip poroznosti, stupanj propusnosti, stupanj deformacija stijena na površini te vodne i morfološke pojave. **Vujnović** (2010.) je načinila klasifikaciju stijena na području Parka prirode Žumberak-Samoborsko gorje prema uputama za izradu Osnovne hidrogeološke karte (**Šarin**, 1988.). Prema toj klasifikaciji stijene užeg područja istraživanja razvrstane su u tri grupe s različitim hidrogeološkim značajkama (slika 4.1.):

### Nevezene kvartarne naslage

Dobre propusnosti – međuzrska poroznost – **a**

### Karbonatne stijene

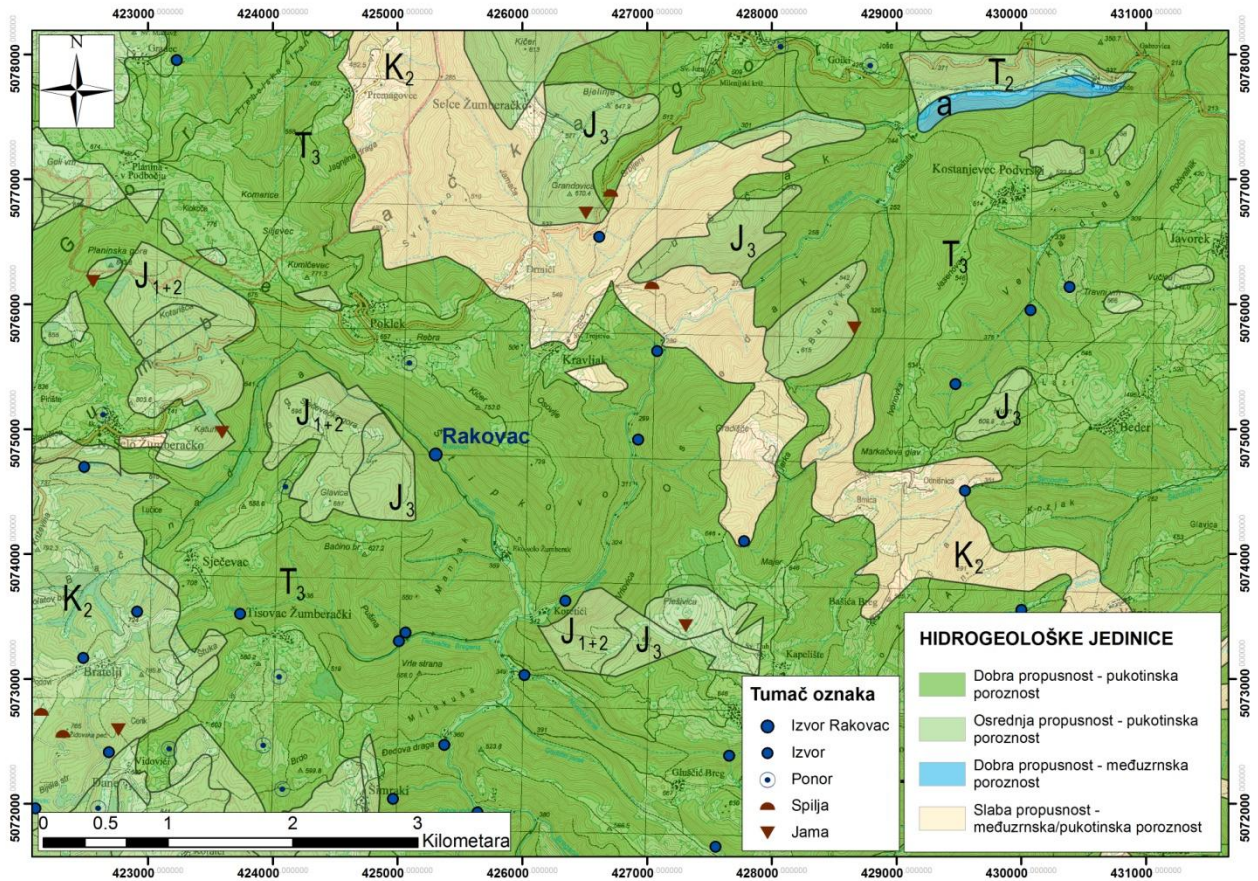
Dobre propusnosti – pukotinska poroznost – **T<sub>3</sub>**

Osrednje propusnosti – pukotinska poroznosti – **T<sub>2</sub>, J<sub>1+2</sub>, J<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>**

### Izmjena klastičnih ili klastičnih i karbonatnih stijena

Slabe propusnosti – međuzrska ili pukotinska poroznost – **K<sub>2</sub>**

Karbonatne stijene odlikuju se pukotinskom poroznošću, a propusnost im je uvjetovana litološkim sastavom i intenzitetom tektonskih deformacija. Dobro propusne karbonatne stijene čine gornjotrijaski dolomiti, koji su intenzivno raspucani po brojnim pukotinskim sustavima. Intenzitet razlomljenosti mjestimice je izražen u tolikoj mjeri da stijene mogu poprimiti svojstva međuzrske poroznosti (šljunka). Za gornjotrijaske dolomite vezani su najznačajniji izvori u području Žumberačkog i Samoborskog gorja te oni predstavljaju glavni vodonosnik. Osrednje propusne karbonatne stijene čine kredne vapnenačke breče, jurski vapnenci i dolomiti te srednjotrijaski dolomiti. Izmjene klastičnih ili klastičnih i karbonatnih stijena sastoje se od krednog fliša (breča, konglomerat, šejl, lapor, vapnenac, čert). Nevezane kvartarne naslage se unutar istraživanog područja pojavljuju se u manjoj mjeri, a čine ih aluvijalne naslage.



Slika 4.1. Digitalizirana Hidrogeološka karta istraživanog područja prema **Vujnović** (2010.)

Izvori Rakovac i Koretić mlin zajedno napajaju rječicu Breganu koja drenira površinu od 50 km<sup>2</sup> izgrađenu uglavnom od gornjotrijaskih dolomita. Izvorište rječice Bregane se nalazi visoko u istočnom dijelu Žumberka, no značajnije napajanje započinje oko 5 km nizvodno od izvorišta, kod izvora Rakovac i Koretić Mlin. Prema **Brkić i dr.** (2002.) izvor Koretić mlin sa izdašnošću od 16 do 80 l/s i Rakovac sa 7 do 152 l/s daju vode koje pripadaju CaMg-HCO<sub>3</sub> hidrokemijskom facijesu. U slivu Bregane je dosadašnjim istraživanjima zabilježeno 436 ponikvi (**Buzjak**, 2006.), 15 speleoloških pojava od čega je šest spilja i devet jama (**Buzjak**, 2001., 2002.; **Buzjak i Rašić**, 2003., 2004.), te devet stalnih i povremenih ponora u gornjotrijaskim i gornjokrednim karbonatima.

## 5. Općenito o recesijskoj analizi

Uzvratno djelovanje krškog hidrogeološkog sustava na punjenje vodom od oborine koja padne na utjecajno slivno područje, ostvaruje se u obliku hidrograma otjecanja na mjestima koncentriranoga pražnjenja – izvorima (**Parlov**, 2010.). Oblik hidrograma istjecanja na izvoru ovisi o više čimbenika – prošlim oborinama, sadašnjim oborinama i pražnjenju vodonosnika, tj. o prethodno akumuliranoj vodi u ocjeditim šupljinama stijenske mase. Ako je pražnjenje izvora uvjetovano samo ocjeditom šupljikavošću, bez poremećaja izazvanih infiltracijom novih kiša, analizom padajućeg (recesijskog) dijela hidrograma dobiva se predodžba o režimu pražnjenja vodonosnika te o glavnim značajkama krškog hidrogeološkog sustava. Infiltracija oborina u vodonosni sustav ovisi o više čimbenika – tipu ocjedite šupljikavosti stijenske mase, stupnju zastupljenosti sitnijih pukotina i klastične ispune, te o geometrijskim značajkama hidrogeološkog sustava. Stoga se hidrogrami otjecanja mogu bitno razlikovati na pojedinim krškim izvorima. Prva reakcija vodonosnika, tj. početno povećanje izdašnosti izvora najčešće je posljedica prenošenja tlaka kroz sustav krških kanala i istjecanje vode iz podzemnih retencija u neposrednom zaleđu izvora, a ne istjecanje infiltriranih kiša.

Recesijska analiza proučava otjecanje u funkciji vremena:

$$Q = Q(t) \tag{5.1}$$

Ne postoji standardna tehnika koja bi definirala ovaj odnos. Dok su neki istraživači proučavali recesiju na temelju jednadžbi baznog toka, drugi su izvodili različite iskustvene formule. Danas se najčešće koriste dva izraza za matematički opis pražnjenja podzemnih voda u bazni tok rijeke kada on nije pod utjecajem oborine, a to su **Boussinesqov** (1904.) i **Mailletov** (1905.), a temelje se na Boussinesqovom radu iz 1877. godine u kojem je proučavao istjecanje na izvoru kao posljedicu stanja u vodonosniku koristeći pritom analogiju s Fourieovim analizama rashlađivanja. U oba izraza dobiva se ovisnost protoka  $Q_t$  u nekom trenutku  $t$  o protoku  $Q_0$  na početku recesije.

Boussinesqova formula je hiperbola oblika:

$$Q_t = \frac{Q_0}{(1+\alpha \cdot t)^2} \tag{5.2}$$

a jednadžba Mailleta daje eksponencijalnu ovisnost:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t} \tag{5.3}$$

gdje su:

$Q_0$  – količina istjecanja na početku vremena  $t$  tijekom recesije ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$Q_t$  – količina istjecanja nakon vremena  $t$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$t$  – vrijeme proteklo između  $Q_0$  i  $Q_t$  (dan)

$e$  – baza prirodnog logaritma

$\alpha$  – koeficijent recesije ( $\text{dan}^{-1}$ ).

Iz jednadžbe (5.3) slijedi da je koeficijent recesije  $\alpha$  jednak:

$$\alpha = -\left(\frac{1}{t}\right) \cdot \ln\left(\frac{Q_t}{Q_0}\right) \quad (5.4)$$

Prelaskom na dekadске logaritme jednadžba (5.4) može se pisati:

$$\log Q_t = \log Q_0 - 0,4343 \cdot t \cdot \alpha \quad (5.5)$$

Iz čega slijedi da je koeficijent recesije  $\alpha$  jednak:

$$\alpha = \frac{\log Q_0 - \log Q_t}{0,4343(t_0 - t_1)} \quad (5.6)$$

Ako se protok u vremenu nacrtu u lin-log mjerilu (vrijeme  $t$  u linearnom, a protok  $Q$  u logaritamskom) dobit će se linearni odnos, tj. pravac gdje nagib pravca predstavlja koeficijent recesije  $\alpha$ .

Koeficijent recesije  $\alpha$  može se koristiti za: 1. prognozu minimalnih protoka; 2. izračun obujma prethodno uskladištene vode i 3. identifikaciju geometrijskih značajki vodonosnika (tip izvorišnog mehanizma, hidrauličke značajke vodonosnika i heterogenost vodonosnika, dimenzije vodonosnika) (**Parlov**, 2018.).

Hidrogeološki krški sustavi s većom mogućnošću zadržavanja pokazuju blaži nagib recesijske krivulje, dok sustavi s velikom provodljivošću i malom akumulacijom vode pokazuju strmiji nagib recesijske krivulje.

Silazni dio hidrograma nacrtan u lin-log mjerilu može imati nekoliko segmenata različitog nagiba, tj. različitih vrijednosti koeficijenata recesije, što ukazuje na različite mikrorežime istjecanja, tj. na složenost hidrogeoloških značajki vodonosnika (**Castany**, 1968.).

U početku istjecanja krivulja recesije je strmija, tj. vrijednosti koeficijenta recesije su veće, što je posljedica brže drenaže iz velikih kaverni i pukotina. Nakon određenog

vremena nagib krivulje je blaži, te su vrijednosti koeficijenta recesije manje, a uzrok tome je polagano istjecanje iz malih pukotina i pora. Prilikom analize krivulja recesije, nagib se može nadomjestiti s više eksponencijalnih krivulja različitih koeficijenta pražnjenja, koji označavanju mikrorežime pražnjenja izvorišta u recesijskim uvjetima. Pražnjenje stalnih izvora najčešće se odvija u dva ili tri mikrorežima.

Pražnjenje u više mikrorežima opisuje Mailletov izraz za izdašnost izvora:

$$Q_t = Q_{01} \cdot e^{-\alpha_1 \cdot t} + Q_{02} \cdot e^{-\alpha_2 \cdot t} + Q_{0n} \cdot e^{-\alpha_n \cdot t} \quad (5.7)$$

gdje su  $Q_{01}$ ,  $Q_{02}$ ,  $Q_{0n}$  – količina istjecanja za prvi, drugi, odnosno  $n$ -ti mikrorežim pražnjenja za vrijeme  $t = 0$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_n$  – koeficijent recesije prve, druge, odnosno  $n$ -te eksponencijalne krivulje ( $\text{dan}^{-1}$ ).

Ista količina oborina ne izaziva uvijek istu reakciju krškog hidrogeološkog sustava u vidu hidrograma pražnjenja. Oblik krivulje recesije ovisi o čitavom nizu čimbenika, a prevladavajuće svojstvo jest šupljikavost, pukotinski sustav i nagib struktura, te sama raspoloživost vode za popunjavanje tih šupljina, tj. položaj razine podzemne vode, zasićenost zone iznad izvora, dotok iz drugih izvora itd. Idealni recesijski uvjeti podrazumijevaju višetjedno razdoblje bez oborine, što je rijetka pojava u umjerenj klimi, stoga ljetne i ranojesenske kiše izazivaju manje ili veće poremećaje na krivuljama recesije, koji se u nekim slučajevima ne mogu jednoznačno otkloniti tijekom analize. Zbog toga je poželjno da se analiza hidrograma obavi na što većem broju recesijskih krivulja iz višegodišnjeg razdoblja. Veći uzorak omogućava dobivanje realne prosječne recesijske krivulje razmatranoga krškoga izvora kao i pouzdanu analizu anvelope minimalnih vrijednosti. Na taj se način s mnogo većom sigurnošću mogu izvoditi zaključci o strukturi i šupljikavosti krškoga hidrogeološkoga sustava, njegovoj akumulacijskoj sposobnosti, te očekivanim minimalnim protocima (**Bačani**, 2006.).

Pojedinačne recesije su pod jakim utjecajem prethodnih uvjeta napajanja, stoga je neophodno povezati ih na način koji omogućuje prosječno opisivanje reakcije u različitim uvjetima pražnjenja vodonosnika. Dobivena konstrukcija naziva se glavna recesijska krivulja i predstavlja srednje stanje pražnjenja vodonosnika.

## 6. Metode konstrukcije krivulje recesije

U ovom radu korištene su dvije metode za konstrukciju glavne krivulje recesije: prilagođena „matching strip“ metoda (**Posavec i dr.**, 2006.) te metoda za konstrukciju glavne krivulje recesije temeljena na trigonometrijskim zakonima (**Posavec i dr.**, 2017.).

Kod svakog vodonosnog sustava reakcija na pojedini događaj oborine očituje se u vidu recesijske krivulje hidrograma na izvoru. Pojedine recesijske krivulje zabilježene u različito vrijeme mogu imati različite nagibe koji ovise o mogućnosti skladištenja, evapotranspiraciji i brzini napajanja. Stoga su razvijene metode kojima se određuje glavna recesijska krivulja za pojedini izvor. Pojedini recesijski segmenti su pod jakim utjecajem prethodnih uvjeta sustava, stoga glavna krivulja recesije predstavlja najvjerojatniji scenarij recesije u određenoj situaciji (**Nathan i McMahon**, 1990.). Konstrukcija glavne recesijske krivulje temelji se na preklapanju pojedinih recesijskih segmenata, pri čemu se najčešće koriste dvije metode: „matching strip“ metoda (**Snyder**, 1939.) i metoda korelacije (**Langbein**, 1938.).

### 6.1. Prilagođena „Matching strip“ metoda

Prilagođena metoda „matching strip“ (**Posavec i dr.**, 2006.) koristi pet različitih linearnih/nelinearnih regresijskih modela kako bi se segmenti prilagodili njihovom pravilnom položaju u glavnoj krivulji recesije. Postupak konstrukcije glavne krivulje recesije sastoji se od nekoliko koraka prikazanih na slici 6.1. Ponajprije je potrebno definirati razdoblja obrade podataka i pohraniti skup podataka u novu proračunsku tablicu, nakon čega slijedi prvi računalni korak podjele vremenskih nizova na kratke segmente koji odgovaraju pojedinačnim recesijskim događajima. Recesijski segmenti se potom poredaju od najvišeg do najnižeg prema početnoj vrijednosti svakog recesijskog segmenta. Nakon sortiranja segmenata slijedi pretvaranje datuma mjerenja iz apsolutnog vremena u relativno vrijeme jednako nuli na početku svakog recesijskog segmenta. Recesijski segment s najvećom početnom vrijednošću, prvi recesijski segment, testira se s pet različitih regresijskih modela (linija trenda) dostupnih u Excelu („Proračun A“ na slici 6.1.), a to su:

1. Linearni ( $y = ax + b$ ),
2. Logaritamski ( $y = a \ln x + b$ ),
3. Polinom drugog reda ( $x = ay^2 + by + c$ ),
4. Opća potencija ( $x = bx^a$ ),

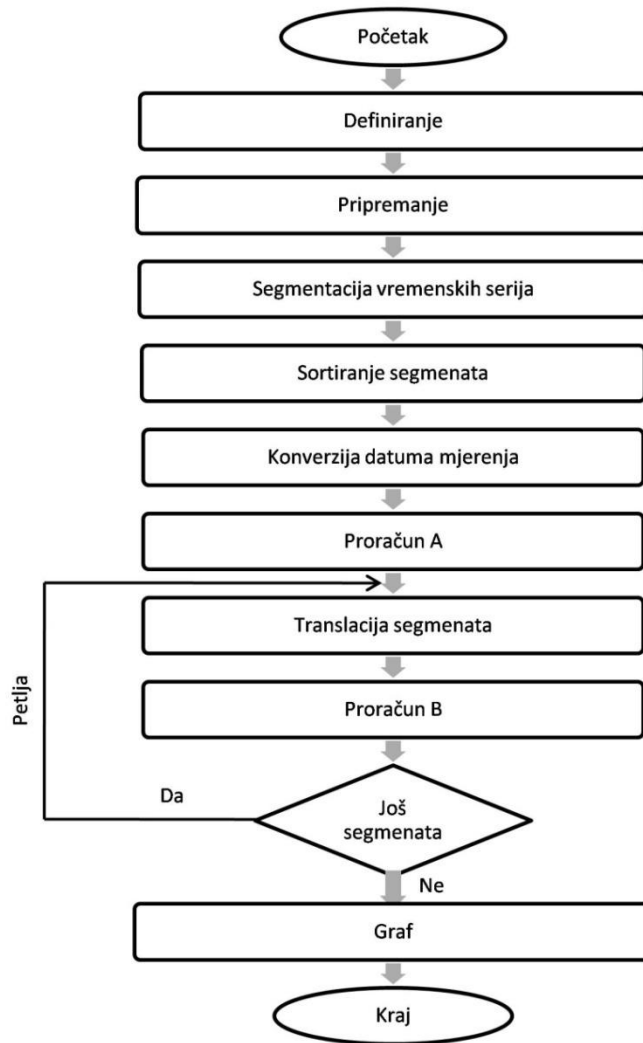
## 5. Eksponencijalni ( $y = be^{ax}$ ),

gdje  $y$  predstavlja količinu istjecanja, a  $x$  vrijeme. Bira se regresijski model koji najbolje odgovara prvom recesijskom segmentu i naziva se prva regresijska krivulja. Kriterij za odabir najprikladnijeg modela u računalnim programima je koeficijent determinacije  $R^2$  (Kirkup, 2002.; Montgomery i Runger, 2003.). Vrijednosti koeficijenta determinacije kreću se između 0 i 1 te pokazuju koliko dobro linija trenda opisuje podatke. Linija trenda je najpouzdanija kada je  $R^2$  blizu 1. Nakon definiranja prve regresijske krivulje, recesijski segment koji ima drugu najveću početnu vrijednosti (drugi recesijski segment), translata se na svoj odgovarajući položaj u prvoj regresijskoj krivulji („translacija segmenata“ na slici 6.1.) na sljedeći način:

- (1) program izračunava vremenski pomak potreban za postavljanje početne točke drugog recesijskog segmenta na prvu regresijsku krivulju. Na primjer: ako je prva regresijska krivulja logaritamska funkcija ( $y = a \ln x + b$ ), vremenski pomak ( $x_2$ ) dan je s  $x_2 = e^{\frac{y_2 - b}{a}}$ , gdje je  $y_2$  početna vrijednosti drugog recesijskog segmenta.
- (2) odgovarajuća relativna vremena preostalih vrijednosti drugog recesijskog segmenta izračunavaju se dodajući  $x_2$  relativnim vremenima preostalih vrijednosti. Kao posljedica toga, drugi recesijski element translata se na odgovarajuće mjesto na prvoj krivulji regresije.

U sljedećem koraku („Proračun B“ na slici 6.1.) regresijska analiza primjenjuje se na podatke prvog i drugog recesijskog segmenta koristeći ponovo svih pet regresijskih modela, a odabire se najbolji regresijski model (druga krivulja regresije). Treći recesijski segment podešava se na odgovarajuće mjesto na drugoj regresijskoj krivulji na isti način kao što je prethodno opisano u koracima (1) i (2) za drugi recesijski segment. Ovi se koraci ponavljaju („Petlja“ na slici 6.1.) pri čemu se svaki sljedeći recesijski segment (s najvećom početnom vrijednošću) translata na opisani način na odgovarajuće mjesto na glavnoj krivulji recesije koja najbolje opisuje sve prethodno translatare recesijske segmente.

Na kraju obrade program kreira grafički prikaz sa svim preklapljenim segmentima recesije i glavnom krivuljom recesije. Dobiveni grafički prikaz omogućuje vizualnu provjeru ispravnog odabira regresijskog modela za generiranje glavne krivulje recesije.



Slika 6.1. Postupak konstrukcije glavne krivulje recesije (Posavec i dr., 2006.)



## 6.2. Metoda temeljena na trigonometrijskim zakonima

Metoda temeljena na trigonometrijskim zakonima za preklapanje recesijskih segmenata i stvaranje glavne recesijske krivulje koristi Excel VBA (Visual Basic za aplikacije) algoritam (Posavec i dr., 2017.). Trigonometrijski zakoni se koriste kako bi se pojedini segmenti recesije vremenskih serija preklopili na odgovarajuće pozicije i kreirali glavnu krivulju recesije. Algoritam korištenjem trigonometrijskih funkcija horizontalno translacija svaki sljedeći recesijski segment vremenskih serija, stavljajući najvišu zabilježenu vrijednost svakog recesijskog segmenta na odgovarajuću liniju, definiranu mjernim točkama prethodnog recesijskog segmenta. Ostatak koda odnosi se na obradu podataka prije i poslije translacije recesijskih segmenata, odnosno na pripremu podataka i vizualni prikaz preklapljenih recesijskih segmenata i glavne recesijske krivulje koristeći pritom linearni/nelinearni regresijski model (Posavec i dr., 2006.).

Opći koncept algoritma sastoji se od nekoliko koraka prikazanih na slici 6.3. U prvom koraku definira se period obrade podataka, nakon čega slijedi segmentacija vremenske serije u drugom koraku, gdje se pojedini recesijski segmenti, odnosno pojedinačni recesijski događaji izdvajaju iz kontinuiranog vremenskog niza. U trećem koraku se izdvojeni pojedinačni segmenti recesije rangiraju od najvišeg do najnižeg, prema njihovim vršnim, tj. najvećim vrijednostima. U sljedećem koraku se apsolutno vrijeme pretvara u relativno vrijeme koje je jednako 0 na početku svakog recesijskog segmenta. Nakon toga se svaki sljedeći recesijski segment vremenske serije horizontalno translacija, stavljajući njihov vrh (najvišu zabilježenu vrijednost) izravno na odgovarajuću liniju definiranu mjernim točkama prethodnog recesijskog segmenta. Ovaj se korak ponavlja u petlji dok svi pojedinačni recesijski segmenti nisu horizontalno translacijom i postavljeni na preklapajuće položaje.

Na slici 6.2. prikazan je koncept korištenja trigonometrijskih funkcija kako bi se svaki sljedeći recesijski segment, odnosno njegov vrh, smjestio izravno na odgovarajuću liniju definiranu mjernim točkama prethodnog recesijskog segmenta. Za ilustraciju koncepta koriste se samo dva recesijska segmenta (slika 6.2.), s obzirom da se svaki sljedeći recesijski segment translacija po istom principu. Kako bi se svaki sljedeći segment recesije horizontalno translacijom izravno na odgovarajuću liniju povezivanja koju definiraju mjerne točke prethodnog recesijskog segmenta, vrši se izračun udaljenosti translacije (TD). Udaljenost translacije (TD) izračunava se kao (vidi sliku 6.2. za opis varijabli):

$$TD = b - d \quad (6.1)$$

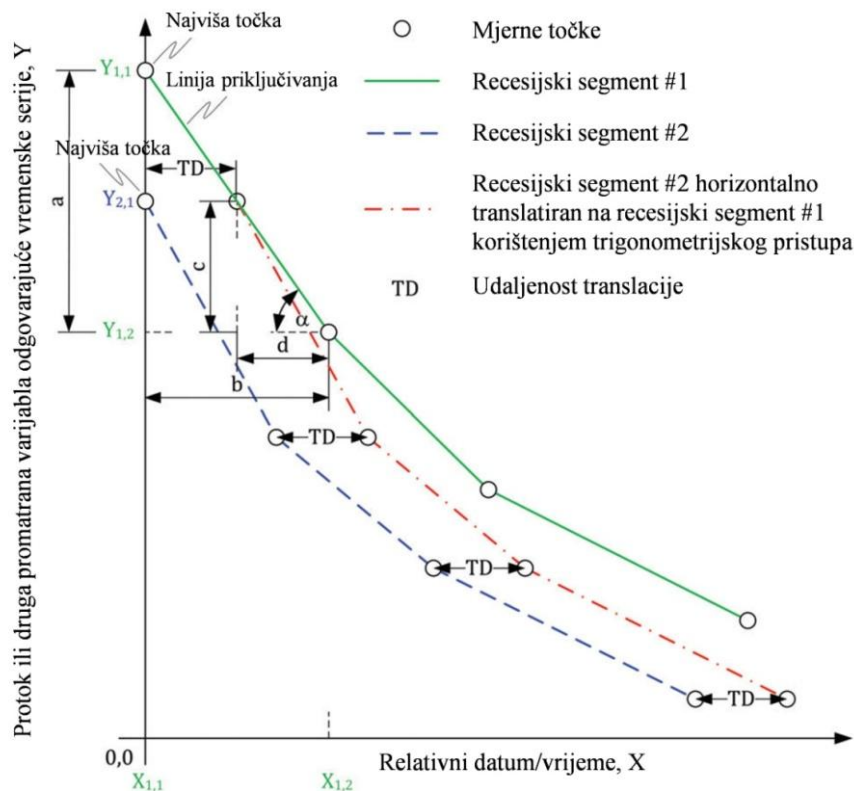
gdje je

$$b = X_{1,2} - X_{1,1} \quad (6.2)$$

i

$$d = \frac{c}{\tan \alpha} = \frac{c}{\frac{a}{b}} = \frac{Y_{2,1} - Y_{1,2}}{\frac{(Y_{1,1} - Y_{1,2})}{(Y_{1,2} - Y_{1,1})}} \quad (6.3)$$

gdje  $X_{1,1}$  i  $X_{1,2}$  predstavljaju relativni datum/vrijeme prve i druge mjerne točke recesijskog segmenta #1,  $Y_{1,1}$  i  $Y_{1,2}$  predstavljaju izmjerene vrijednosti protoka ili druge promatrane varijable odgovarajuće vremenske serije prve i druge mjerne točke recesijskog segmenta #1. Prema tome  $Y_{2,1}$  predstavlja prvu izmjerenu vrijednost protoka ili druge promatrane varijable recesijskog segmenta #2.

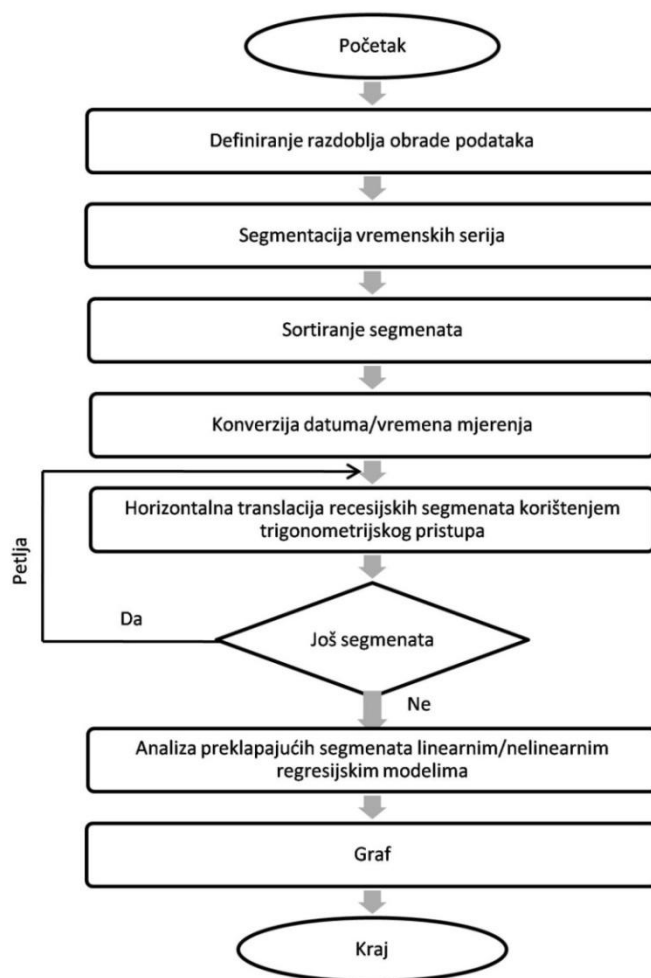


Slika 6.2. Koncept korištenja trigonometrijskih funkcija prilikom translacije recesijskih segmenata (Posavec i dr., 2017.)

U šestom koraku korištenjem pet linearnih/nelinearnih regresijskih modela (linearni, snaga, eksponencijalni, logaritamski i polinom drugog stupnja) analizira se kompozicija

preklapajućih pojedinačnih recesijskih segmenata, kako bi se dobio najbolje prilagođeni regresijski model, tj. glavna krivulja recesije. Kriterij za odabir najprikladnijeg modela je koeficijent determinacije  $R^2$ . Na kraju obrade dobiva se grafički prikaz koji prikazuje sve preklapljene recesijske segmente i glavnu krivulju recesije. Koeficijent determinacije je također prikazan na grafu, što omogućuje njegovu usporedbu s vizualnom procjenom ispravnosti odabranog recesijskog modela, odnosno glavne krivulje recesije.

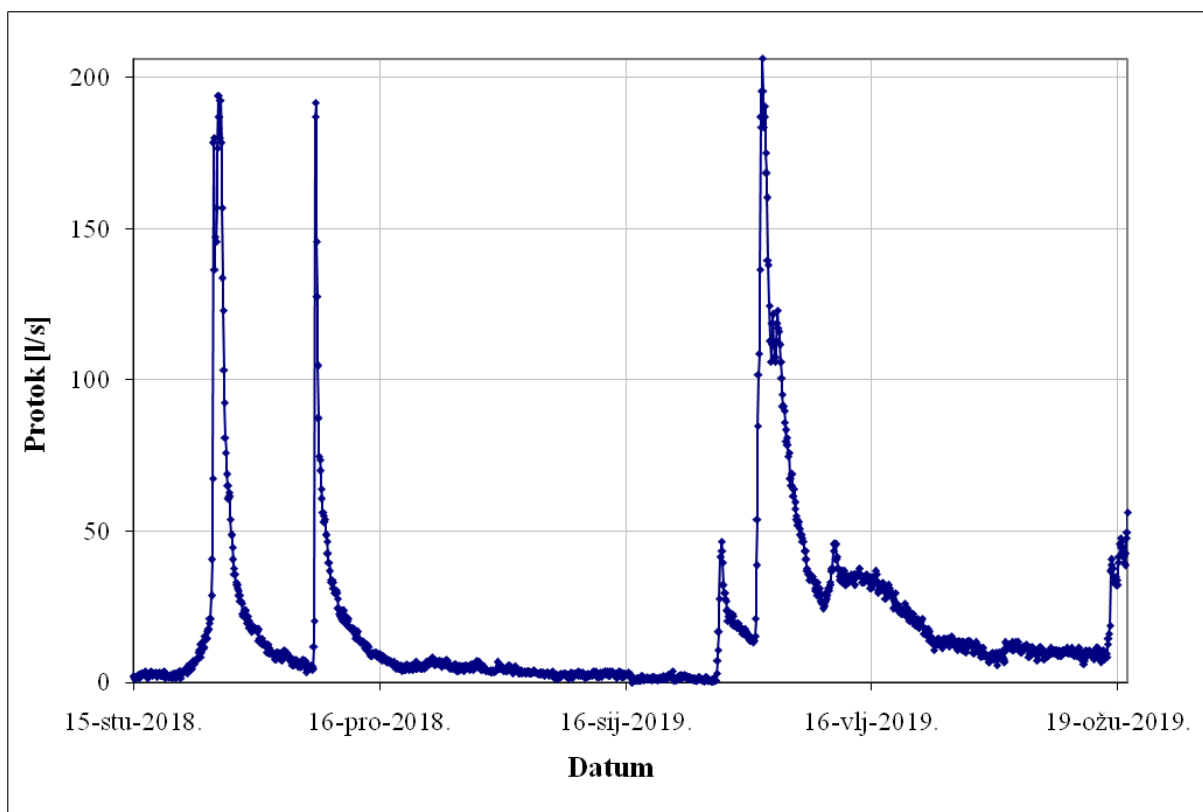
Valja napomenuti da za svaku translaciju sljedećeg recesijskog segmenta, tj. za svaku petlju u postupku izračuna, algoritam najprije provjerava pada li vrh sljedećeg recesijskog modela između prve i druge točke mjerenja prethodnog recesijskog segmenta ili između bilo kojeg drugog para mjernih točaka. Drugim riječima, algoritam pretražuje najbliže vrijednosti u prethodnom segmentu recesije koje su više i niže od vrha sljedećeg recesijskog segmenta.



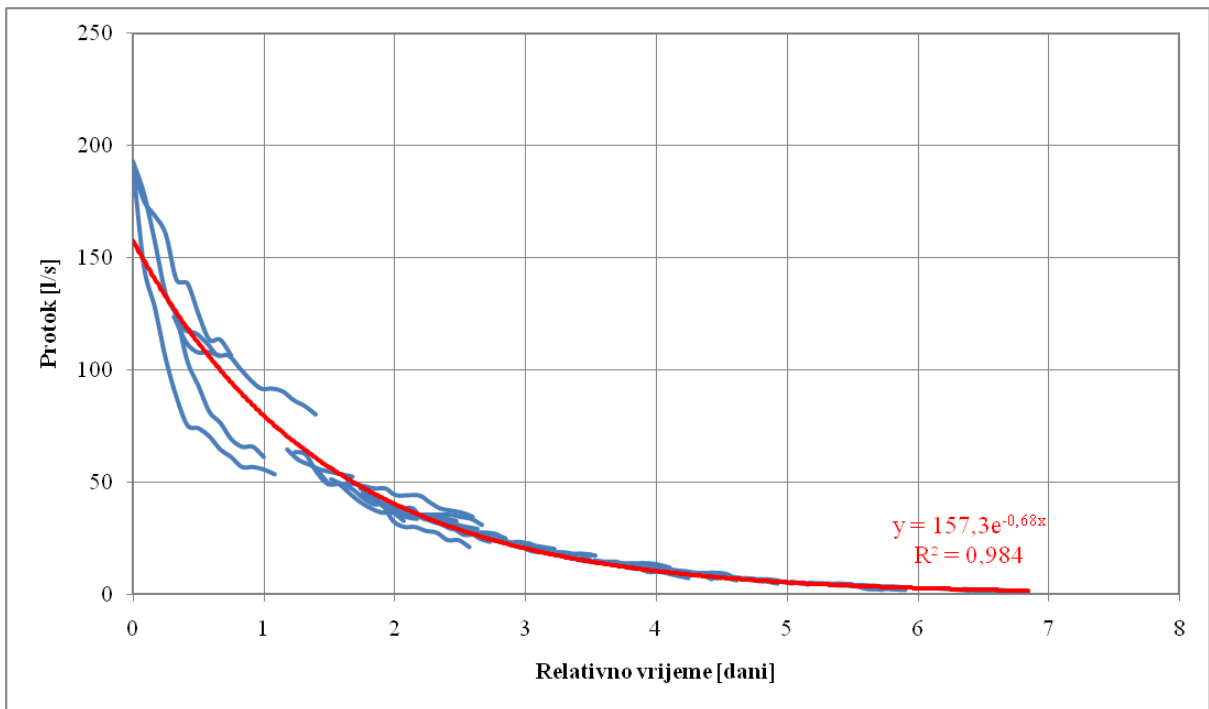
Slika 6.3. Postupak konstrukcije glavne krivulje recesije (Posavec i dr., 2017.)

## 7. Konstrukcija glavne recesijske krivulje

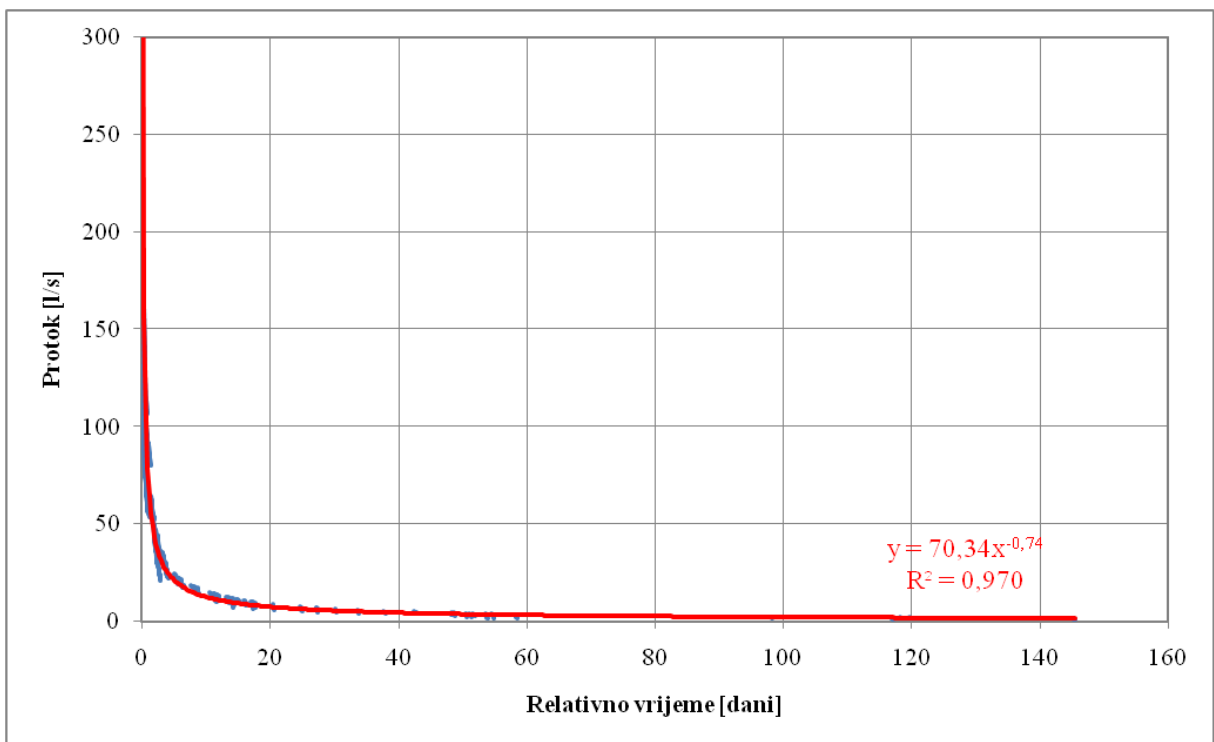
U ovom diplomskom radu za konstrukciju glavne krivulje recesije korištena je prilagođena „matching strip“ metoda (Posavec i dr., 2006.) te metoda temeljena na trigonometrijskim funkcijama (Posavec i dr., 2017.). Metode su primijenjene na izvoru Rakovac za mjerenja izdašnosti u vremenskom razdoblju od 15.11.2018. do 24.04.2019. godine. Mjerenja izdašnosti izvora u tom razdoblju obavljao je Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Na temelju podataka izdašnosti u vremenu dobiven je hidrogram dnevnih protoka izvora Rakovac prikazan na slici 7.1. Iz hidrograma dnevnih protoka može se uočiti pet vodnih valova, što znači da se prilikom konstrukcije glavne krivulje recesije preklapa pet recesijskih segmenata. Načinjena je konstrukcija glavne recesijske krivulje pomoću svih pet regresijskih modela (linearni ( $y = ax + b$ ), logaritamski ( $y = a \ln x + b$ ), polinom drugog reda ( $x = ay^2 + by + c$ ), opća potencija ( $x = bx^a$ ), eksponencijalni ( $y = be^{ax}$ )) te pomoću metode temeljene na trigonometrijskim funkcijama (slika 7.2.-7.7.). Dobivena rješenja pokazala su kako se recesijski segmenti hidrograma izvora Rakovac mogu najbolje opisati eksponencijalnom krivuljom (slika 7.2.) čiji koeficijent determinacije  $R^2$  iznosi 0,984.



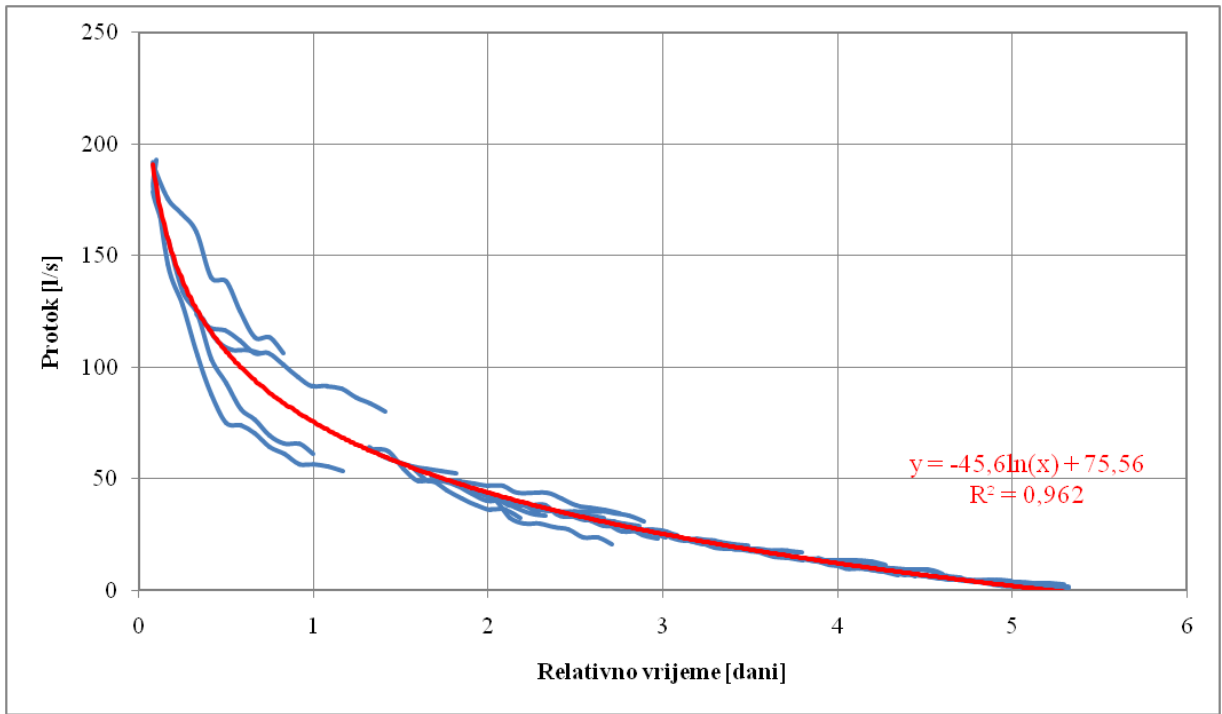
Slika 7.1. Hidrogram dnevnih protoka izvora Rakovac



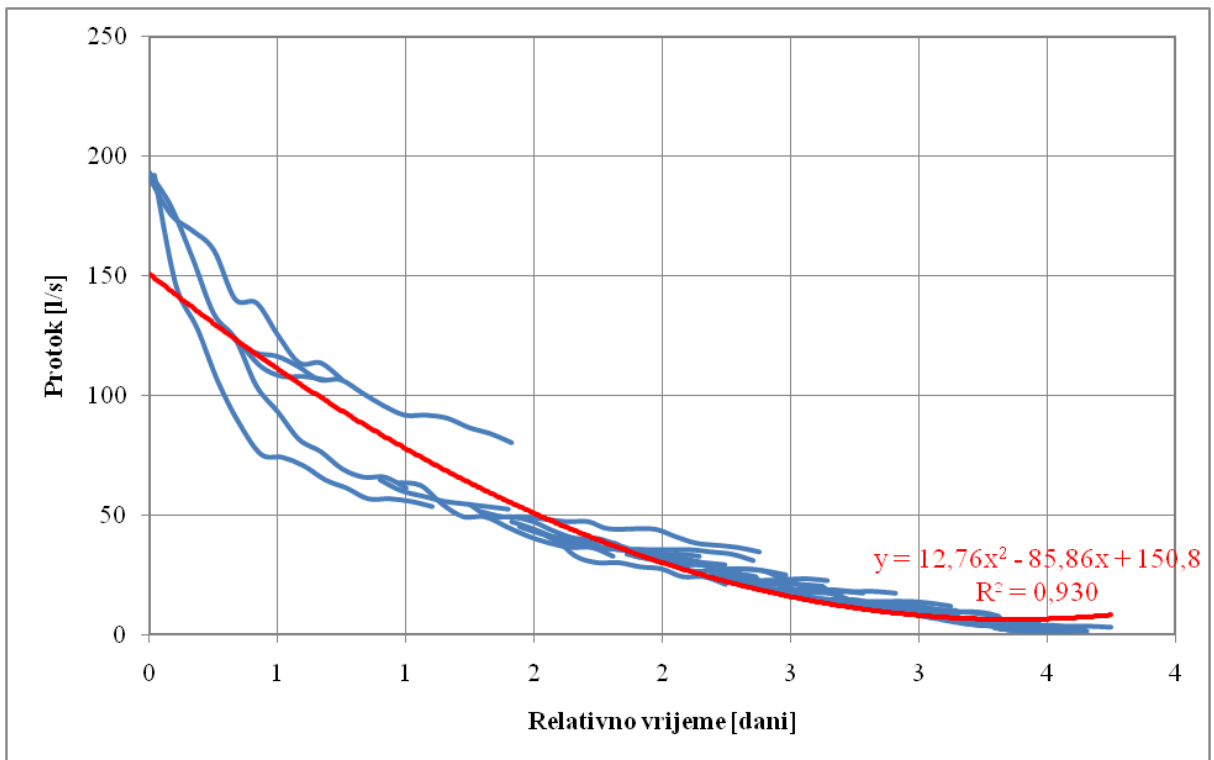
Slika 7.2. Glavna krivulja recesije hidrograma izvora Rakovac konstruirana eksponencijalnim regresijskim modelom



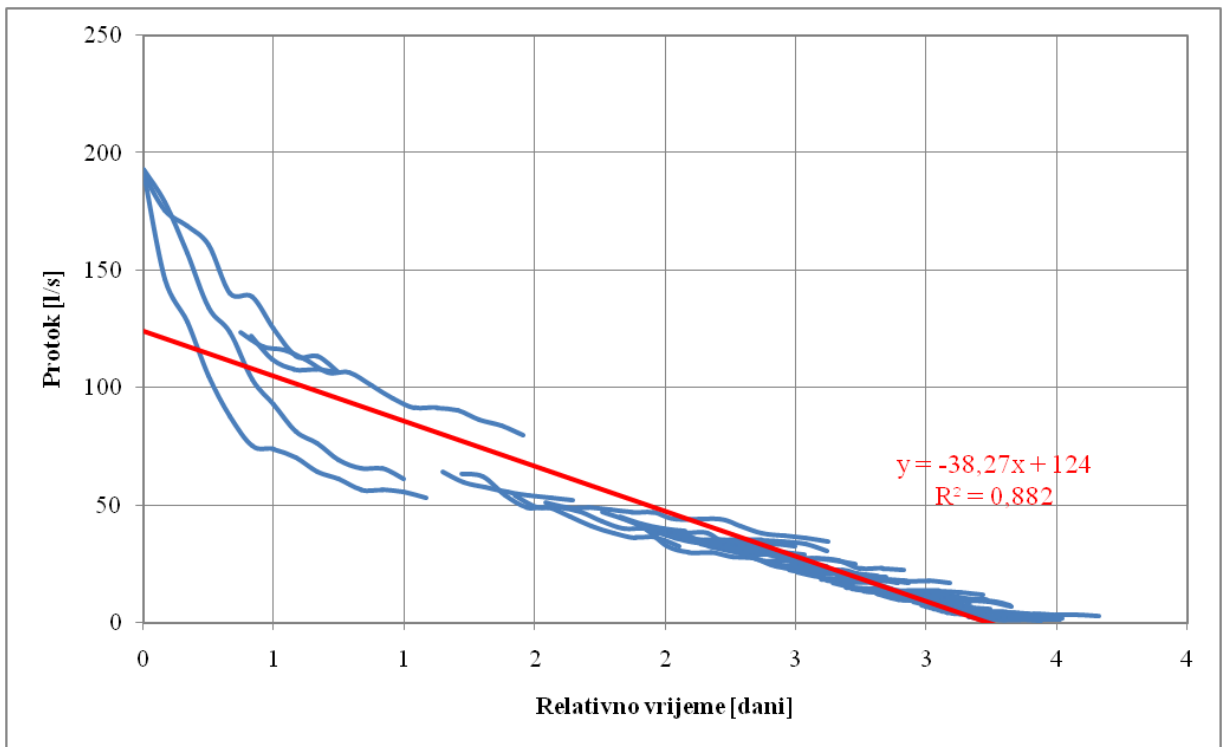
Slika 7.3. Glavna krivulja recesije hidrograma izvora Rakovac konstruirana regresijskim modelom opće potencije



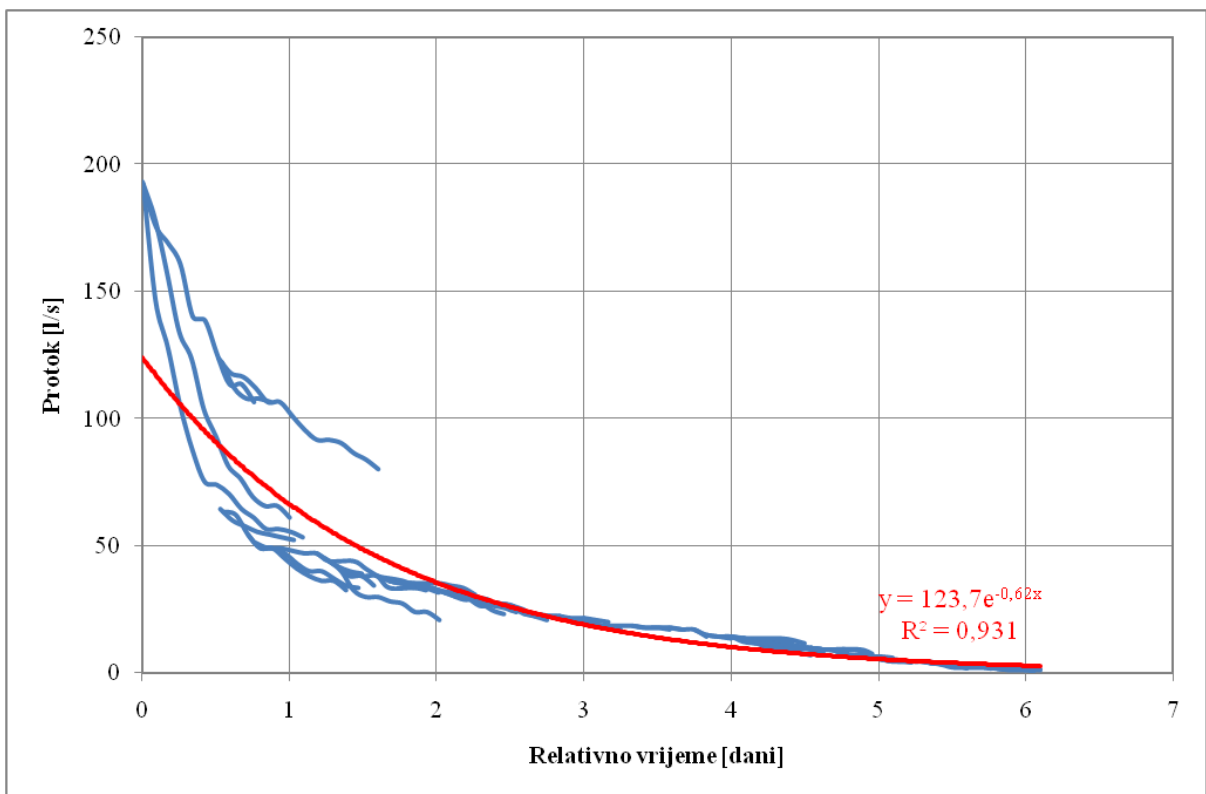
Slika 7.4. Glavna krivulja recesije hidrograma izvora Rakovac konstruirana logaritamskim regresijskim modelom



Slika 7.5. Glavna krivulja recesije hidrograma izvora Rakovac konstruirana regresijskim modelom polinoma drugog reda



Slika 7.6. Glavna krivulja recesije hidrograma izvora Rakovac konstruirana linearnim regresijskim modelom



Slika 7.7. Glavna krivulja recesije hidrograma izvora Rakovac konstruirana pomoću trigonometrijskih funkcija

## 8. Interpretacija dobivenih rezultata

Iz hidrograma dnevnih protoka (slika 7.1.) vidljivo je da se izvor Rakovac odlikuje naglim promjenama izdašnosti u kratkom vremenskom razdoblju. U razdoblju mjerenja od 15.11.2018. do 24.04.2019. godine zabilježeno je pet vodnih valova. Vodni valovi su kratkotrajni, što ukazuje na male zalihe podzemnih voda koje bi bilo moguće koristiti za potrebe vodoopskrbe. Općenito sustavi s velikom sprovodnom, a malom retencijskom moći imaju strmiji nagib recesijske krivulje (Parlov, 2018.). S obzirom na kratko trajanje vodnih valova, odnosno brzo pražnjenje vodonosnog sustava, može se pretpostaviti kako se tok vode odvija u dobro topivoj stijeni, odnosno duž tektonski razlomljenih zona koje su sklone jačem okršavanju. Kako bi se ta pretpostavka utvrdila potrebno je izraditi korelacijsku analizu ovisnosti izdašnosti o oborinama. Prema prikazu Osnovne geološke karte, izvor Rakovac nalazi se unutar dolomitnog kompleksa, no s obzirom na brzinu rasta i pada hidrograma, potrebno je razmotriti mogućnost da se tok podzemne vode odvija kroz dobro topive vapnence.

Za konstrukciju glavne krivulje recesije korištena je prilagođena „matching strip“ metoda (Posavec i dr., 2006.) te metoda temeljena na trigonometrijskim funkcijama (Posavec i dr., 2017.). Prilagođenom „matching strip“ metodom dobivene su glavne krivulje recesije pet regresijskih modela (linearni ( $y = ax + b$ ), logaritamski ( $y = a \ln x + b$ ), polinom drugog reda ( $x = ay^2 + by + c$ ), opća potencija ( $x = bx^a$ ) i eksponencijalni ( $y = be^{ax}$ )). Dobivene glavne krivulje recesije prikazane su redom od slike 7.2. do slike 7.6. Glavna krivulje recesije konstruirana pomoću trigonometrije prikazana je na slici 7.7.

Usporedbom dobivenih rezultata, kao relevantna uzeta je krivulja recesije konstruirana pomoću eksponencijalnog regresijskog modela (slika 7.2.) čiji koeficijent determinacije iznosi  $R^2=0,984$ . Grafički prikaz eksponencijalne glavne krivulje recesije ukazuje na dobro preklapanje svih recesijskih segmenata, naročito u kasnijoj fazi recesije, odnosno u tzv. „baznom toku“. U ranijoj fazi recesije vidljive su promjene nagiba preklapljenih recesijskih segmenata, što ukazuje na veću površinu sabirnog područja te različitu prostornu raspodjelu intenzivnih oborina unutar sliva. Oborine pale na različitim lokacijama unutar slivnog područja, infiltriraju se u podzemlje i različitim putem kroz podzemni vodonosni sustav dospijevaju do mjesta izviranja. Time se dobiva različit režim pražnjenja uočen na grafičkom prikazu.



Osim glavne krivulje recesije dobivene eksponencijalnim regresijskim modelom, recesijska krivulja dobivena logaritamskim regresijskim modelom (slika 7.4.) također pokazuje dobre rezultate. U ovom je slučaju koeficijent determinacije  $R^2$  nešto manji te iznosi 0,962, međutim u grafičkom prikazu vidljivo je vrlo dobro preklapanje svih recesijskih segmenata koje opisuje jedna glavna krivulje recesije. Rezultati dobiveni ostalim regresijskim modelima nisu prihvatljivi.

Rezultati dobiveni metodom temeljenom na trigonometriji (slika 7.7.) daju nešto lošiju vizualnu interpretaciju. Iako koeficijent determinacije iznosi  $R^2=0,931$ , na grafičkom prikazu vidljivo je kako se recesijski segmenti nisu u potpunosti mogli opisati dobivenom glavnom krivuljom recesije. Ako se istjecanje na izvoru ne može opisati jednom jednadžbom, kao u ovom slučaju, potrebno ga je opisati s više jednadžbi koje vrijede za pojedina trajanja recesije. U tom slučaju glavna krivulja recesije je dvo-, tro-, ili višedijelna krivulja. Za konstrukciju takve višedijelne krivulje koristi se potpuno automatizirana „matching strip“ metoda (**Posavec i dr.**, 2010.) koja nije korištena u okviru ovog rada, s obzirom da su rezultati dobiveni prilagođenom „matching strip“ metodom zadovoljavajući.

Usporedbom glavne krivulje recesije dobivene prilagođenom „matching strip“ metodom i metodom temeljenoj na trigonometriji vidljivo je da su u ovom slučaju ostvareni bolji rezultati eksponencijalnim regresijskim modelom, odnosno prilagođenom „matching strip“ metodom. Iako je bilo za očekivati da će novija metoda temeljena na trigonometrijskim funkcijama dati bolje rezultate, u analizi izvora Rakovac to nije bio slučaj. Stoga se ne može odrediti koja će od dviju metoda općenito dati bolje rezultate za konstrukciju glavne krivulje recesije. Prilikom analize recesijske krivulje potrebno je primijeniti obje metode kako bi se utvrdilo koja od metoda daje bolje rezultate u danim uvjetima.

Glavna razlika između ove dvije metode jest u postupku postavljanja svakog sljedećeg recesijskog segmenta na prethodni. Metoda temeljena na trigonometriji smješta vrh svakog sljedećeg recesijskog segmenta izravno na odgovarajuću liniju povezivanja, koja je određena mjernim točkama prethodnog recesijskog segmenta. S druge strane, prilagođena „matching strip“ metoda vrh svakog sljedećeg recesijskog segmenta smješta na funkciju jednog od pet linearnih/nelinearnih regresijskih modela. Metoda temeljena na trigonometriji jednostavnija je od prilagođene „matching strip“ metode, zbog čega znatno brže konstruira glavnu krivulju recesije. Stoga se ova metoda preporučuje za vrlo velike skupove podataka koji su zahtjevniji za računanje.

## 9. Zaključak

Analiza recesijskog dijela hidrograma izvora korisna je metoda prilikom određivanja površine sliva, količine oborina palih na sliv te hidrogeološke situacije unutar krškog vodonosnog sustava. U svakom vodonosnom sustavu pojedinačni recesijski segmenti zabilježeni u različito vrijeme odlikuju se različitim nagibima ovisno o čitavom nizu čimbenika poput varijabilnosti uskladištenja, gubicima isparavanjem, brzini ponovnog punjenja itd. Zbog toga su razvijene metode koje se bave vremenskim nizovima istjecanja na izvoru, temeljene na preklapanju pojedinih recesijskih segmenata, kako bi se dobila glavna krivulja recesije.

U radu su korištene dvije metode razvijene za konstrukciju glavne krivulje recesije: prilagođena „Matching strip“ metoda (**Posavec i dr.**, 2006.) i metoda temeljena na trigonometrijskim funkcijama (**Posavec i dr.**, 2017.). Iz prethodnih studija (**Posavec i dr.**, 2017.) pokazalo se kako u određenim uvjetima bolje rezultate daje prilagođena „matching strip“ metoda, doku nekoj drugoj situaciji metoda temeljena na trigonometriji pokazuje bolje preklapanje recesijskih segmenata. Prilikom analize recesijskih segmenata hidrograma izvora Rakovac, relevantnom se pokazala prilagođena „matching strip“ metoda. Stoga je prilikom analize recesijske krivulje potrebno primijeniti obje metode kako bi se utvrdilo koja od metoda u danim uvjetima daje bolje rezultate.

Eksponencijalna glavna krivulja recesije pokazuje uže preklapanje recesijskih segmenata u odnosu na ostale regresijske modele, što za rezultat ima veći koeficijent determinacije  $R^2=0,984$ . U grafičkom prikazu vidljivo je da su svi recesijski segmenti preklapljeni i opisani jednom glavnom krivuljom recesije. Također se uočavaju promjene nagiba recesijskih segmenata u ranijoj fazi recesije iz čega proizlazi zaključak o postojanju veće slivne površine izvora Rakovac. Naime oborine pale na različitim lokacijama unutar slivnog područja, infiltriraju se u podzemlje i različitim putem kroz podzemni vodonosni sustav dopijevaju do mjesta izviranja. Time se dobiva različit režim pražnjenja uočen na grafičkom prikazu.

Složeni hidrogram izvora Rakovac pokazuje nagle promjene izdašnosti u vremenu. Iako je razdoblje mjerenja izdašnosti vrlo kratko, u vremenskom intervalu od 15.11.2018. do 24.04.2019. godine zabilježeno je pet vodnih valova na temelju kojih je načinjena ova analiza. Po obliku vodnih valova hidrograma izvora Rakovac, osobito po strmom nagibu

recesijskih krivulja, može se zaključiti kako vodonosni sustavima slabu sposobnost zadržavanja vode.

## 10. Literatura

- AMIT, H., V. LYAKHOVSKY, A. KATZ, A. BURG. 2002. Interpretation of Spring Recession Curves. *Ground Water* 40, no.5: 543-551.
- BAČANI, A. 2006. Hidrogeologija I. *Rudarsko geološko naftni fakultet, Zagreb*, p. 198.
- BOGNAR, A. 1980. Tipovi reljefa kontinentalnog dijela Hrvatske. *Spomen-Zbornik o 30.obljetnici Geografskog društva Hrvatske, Zagreb*, p. 39-60.
- BOUSSINESQ, J. 1904. Recherches theoretiques sur l'ecoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le debit des sources. *Journal de Mathematiques Pures et Appliquees*, 10, 5-78.
- BRKIĆ, Ž., M. KUHTA, D. SINGER. 2002. Geological and hydrogeological basis of Žumberak and Samoborsko gorje nature park (in Croatian). *Fond stručne dokumentacije Parka prirode „Žumberak-Samoborsko gorje“*, Slani Dol
- BUKOVAC, J., T. GRGASOVIĆ, T., Ž. GLOVACKI JERNEJ, G. JERINIĆ, I. GALOVIĆ, B. PRTOĻJAN. 1995. Litostratigrafska raščlamba dolomitnih naslaga trijasa jugozapadnog Žumberka u okviru radova na geološkoj karti Republike Hrvatske 1:50.000. *Zbornik radova 1. Hrvatskog geološkog kongresa Opatija, Zagreb*, p. 137-143.
- BUZJAK, N. 2001. Speleološke pojave Parka prirode „Žumberak-Samoborsko gorje“, 1. dio. *Fond stručne dokumentacije Parka prirode „Žumberak-Samoborsko gorje“*, Slani Dol.
- BUZJAK, N. 2002. Speleološke pojave Parka prirode „Žumberak-Samoborsko gorje“, 2. dio. *Fond stručne dokumentacije Parka prirode „Žumberak-Samoborsko gorje“*, Slani Dol.
- BUZJAK, N.& RAŠIĆ, I., 2003. Speleološke pojave Parka prirode „Žumberak-Samoborsko gorje“, 3. dio. *Fond stručne dokumentacije Parka prirode „Žumberak-Samoborsko gorje“*, Slani Dol.
- BUZJAK, N. & RAŠIĆ, I., 2004. Speleološke pojave Parka prirode „Žumberak-Samoborsko gorje“, 4. dio. *Fond stručne dokumentacije Parka prirode „Žumberak-Samoborsko gorje“*, Slani Dol.

- BUZJAK, N. 2006. Geomorfološke i speleomorfološke značajke Žumberačke gore i geokološko vrednovanje endokrškog reljefa. Disertacija, *PMF, Sveučilište u Zagrebu*.
- CASTANY, G. 1968. Prospection et Exploitation des Eaux Souterraines. *DUNOT, Paris*, p. 1-717.
- DUJMOVIĆ, I. 1994. Geomorfološke osobine sjeveroistočnog dijela Žumberačke gore. Magistarski rad, *PMF, Sveučilište u Zagrebu*.
- FIORILLO, F. 2014. The Recession of Spring Hydrographs, Focused on Karst Aquifers. *Water Resour Manage* 28:1781–1805.
- GRGASOVIĆ, T., 1998. Stratigrafija gornjotrijaskih naslaga Žumberka. Magistarski rad, *PMF, Zagreb*, p. 136.
- HERAK, M., S. BAHUN, A. MAGDALENIĆ. 1969. Pozitivni i negativni utjecaji na razvoj krša u Hrvatskoj, *Krš Jugoslavije*
- KIRKUP, L. 2002. Data Analysis with Excel<sup>®</sup>. An Introduction for Physical Scientists. *Cambridge, U.K.: Cambridge University Press*
- LANGBEIN, W.B. 1938. Some channel storage studies and their application to the determination of infiltration. *Eos, Transactions, American Geophysical Union* 19, 435-447.
- MAILLET, E. 1905. Essais d'Hydraulique souterraine et fluviale. *Hermann, Paris*.
- MAYAUD C., T. WAGNER, R. BENISCHKE, S. BIRK. 2016. Understanding changes in the hydrological behaviour within a karst aquifer (Lurbach system, Austria). *Carbonates Evaporites*, 31:357–365
- MONTGOMERY, C.M., AND G.C. RUNGER. 2003. *Applied Statistics and Probability for Engineers*, 3rd ed. New York: John Wiley & Sons Inc.
- NATHAN, R.J., AND T.A. MCMAHON. 1990. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research* 26, no. 7: 1465-1473.
- POSAVEC, K., A. BAČANI, AND Z. NAKIĆ. 2006. A visual basic spreadsheet macro for recession curve analysis. *Ground Water* 44, no. 5: 764-767.

- POSAVEC, K., J. PARLOV, AND Z. NAKIĆ. 2010. Fully Automated Objective-Based Method for Master Recession Curve Separation. *Ground Water* 48, no. 4:598-603.
- POSAVEC, K., M. GIACOPETTI, M. MATERAZZI, AND S. BIRK. 2017. Method and Excel VBA Algorithm for Modeling Master Recession Curve Using Trigonometry Approach. *Ground Water* 55, no. 6: 891-898
- PARLOV, J. 2010. Identifikacija parametara za modeliranje toka podzemne vode glavnih izvora u porječju Mirne. Doktorska disertacija, *Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu*. p. 49-52.
- PARLOV, J. (2018): Hidrogeologija krša. Radna verzija skripte za akademsku godinu 2018/2019, RGNF, Zagreb
- RELOTA, J. 2011. Analiza utjecaja oborina na oblik recesijske krivulje izvora. Diplomski rad, *Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu*.
- SNYDER, F.F. 1939. A concept of runoff-phenomena. *Eos, Transactions, american Geophysical Union* 20, 725-738.
- ŠARIN, A. 1988. Upute za izradu Osnovne hidrogeološke karte Jugoslavije, M 1:100.000. Drugo, izmijenjeno i dopunjeno izdanje. *Savezni geološki zavod, Beograd*
- ŠIKIĆ, K., O. BASCH, A. ŠIMUNIĆ. 1977. Osnovna geološka karta SFRJ, 1:100.000, list Zagreb L 33-80, *Institut za geološka istraživanja Zagreb, Savezni geološki zavod Beograd*.
- ŠIKIĆ, K., O. BASCH, A. ŠIMUNIĆ. 1979. Osnovna geološka karta SFRJ, 1:100.000, Tumač za list Zagreb L 33-80, *Institut za geološka istraživanja Zagreb, Savezni geološki zavod Beograd*.
- VUJNOVIĆ, T. 2010. Hidrogeološke značajke Park prirode “Žumberak – Samoborsko gorje”. Doktorska disertacija, *Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu*. p. 8-9., 11-30.